



**Ana Beatriz Alves dos Santos Baptista Machado**  
Licenciada

## **Contribuição para a Avaliação Estrutural de Infraestruturas Rodoviárias por Métodos Não Destrutivos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de construção

Orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora  
Auxiliar Convidada da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Doutora Ana Cristina Freire,  
Investigadora Auxiliar do LNEC

Júri:

Presidente: Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca,  
Professor Auxiliar Convidado da Faculdade e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutor José Manuel Coelho das Neves, Professor  
Auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica  
de Lisboa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

dezembro de 2012

“Copyright” Ana Beatriz Alves dos Santos Baptista Machado, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero agradecer à Professora Doutora Simona Fontul pelo incentivo, apoio, disponibilidade e determinação demonstrada durante a elaboração da dissertação.

De seguida, quero agradecer a Engenheira Ana Cristina Freire pela disponibilidade e o apoio durante o decorrer deste trabalho.

Quero agradecer, especialmente, à minha família, amigos e namorado pelo apoio e paciência demonstrada na concretização desta dissertação e durante o meu percurso académico.

Aos professores, colegas e funcionários da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que me acompanharam e que de alguma forma me ajudaram a crescer profissionalmente durante o percurso académico, a todos, deixo o meu “Obrigada”.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer ao Departamento de Transportes, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a disponibilidade demonstrada para a realização dos ensaios necessários para este trabalho.





## Resumo

Os ensaios de carga não destrutivos são cada vez mais utilizados para avaliação da capacidade de carga de infraestruturas de transporte. Assim, no âmbito destes estudos foram caracterizadas várias estruturas através da realização e interpretação de ensaios não destrutivos, com os equipamentos disponíveis no LNEC, Defletómetro de Impacto (FWD) e Defletómetro de Impacto Portátil (DIP).

Os ensaios foram realizados em quatro estruturas de pavimentos flexíveis, uma em material granular e as outras três em misturas betuminosas, com várias espessuras de camadas.

Para um melhor entendimento do comportamento dos materiais e definição de metodologias de ensaio, foram realizados ensaios em diversas condições de carga e de temperaturas do pavimento. Foram realizados ensaios com os dois equipamentos acima referidos em simultâneo por forma a comparar os resultados obtidos e estudar possíveis correlações.

Com base nos ensaios realizados foram estabelecidos modelos estruturais através de retro análise e comparados os resultados obtidos. Foi estudada também a possibilidade de correlação através de utilização de interpretações diretas, com base nas deflexões, como estimativa de módulos equivalentes. Foi calculada também a capacidade de carga dos pavimentos estudados e a respetiva vida útil.

De seguida, recorreu-se a um estudo paramétrico, no intuito de avaliar o comportamento de pavimentos flexíveis, considerando como alternativa a utilização de camadas espessas de misturas betuminosas, aplicação de material granular de boa qualidade nas camadas de base e sub-base.

Apresentam-se as principais conclusões e recomendações de aplicação de ensaios de carga não destrutivos na avaliação de pavimentos flexíveis, de modo, a melhorar a caracterização em função de cada tipo de estrutura.

**Palavras-chave:** Defletómetro de Impacto (FWD), Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP), Retroanálise, Período de vida útil, Infraestruturas rodoviárias.





## Abstract

The non-destructive load testing is increasingly used to evaluate the bearing capacity of transport infrastructures. Thus, within this research, various pavement structures were characterized through performing and interpretation of non-destructive tests, with Falling Weight Deflectometer (FWD) and Light Falling Weight Deflectometer (DIP), equipment available at LNEC.

Several tests were performed on four flexible pavement structures, one with granular material and the other three with various thicknesses of bituminous mixtures layers.

For a better understanding of materials behavior and improvement of testing methodology, tests were performed in different conditions of load levels and pavement temperatures. Also, tests were performed with both load devices simultaneously, in order to compare the results and explore possible correlations.

Structural models were established, based on the deflections measured, through backcalculation and the results obtained were analysed and compared. The possibility of correlation between the results obtained with both devices, using a simplified interpretation, was also studied. Thus, a deformation modulus was calculated, based on the central deflection, measured during tests. The bearing capacity of the pavements was also calculated as well as the corresponding remaining life.

Afterward, a sensitivity study was performed in order to evaluate the behavior of flexible pavements. In this study, the use of granular material of good quality, in base and sub-base layers, was analysed as an alternative to thick bituminous layers.

At last, the main conclusions and recommendations for the application of non-destructive load tests for flexible pavements evaluation are presented, in order to improve the testing methodology, accordingly to the pavement structure studied.

**Keywords:** Falling Weight Deflectometer (FWD), Light Falling Weight Deflectometer (DIP), backanalyse, remeaning life.



## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivo .....	1
1.3	Estrutura da Dissertação .....	2
2	Procedimento de avaliação estrutural .....	5
2.1	Introdução .....	5
2.2	Constituição de pavimentos flexíveis.....	5
2.2.1	Considerações gerais.....	5
2.2.2	Solos .....	7
2.2.3	Materiais granulares .....	9
2.2.4	Misturas com ligantes hidráulicos.....	13
2.2.5	Misturas betuminosas.....	15
2.3	Métodos de avaliação da capacidade de carga.....	19
2.3.1	Evolução histórica .....	19
2.3.2	Defletómetro de Impacto (FWD) .....	25
2.3.3	Defletómetro de Impacto Portátil (DIP) .....	28
2.3.4	Deflectómetros para medição a Alta Velocidade.....	31
2.4	Medição da espessura das camadas - Radar de Prospeção (GPR).....	32
2.5	Critérios de Ruína .....	35
2.5.1	Critério de fadiga .....	36
2.5.2	Critério de deformação permanente .....	39
2.5.3	Novas abordagens .....	39
2.6	Modelação do comportamento do pavimento.....	40
2.7	Considerações finais.....	43
3	Interpretação dos ensaios de carga .....	45
3.1	Apresentação geral .....	45
3.2	Descrição do modelo físico ensaiado .....	46

3.3	Ensaio de carga realizados no modelo físico .....	48
3.4	Interpretação dos ensaios realizados com o FWD .....	48
3.4.1	Pré-processamento de dados – normalização e filtragem.....	48
3.4.2	Processo de retroanálise .....	50
3.4.3	Análise dos resultados.....	54
3.4.4	Consideração da camada parcialmente descolada .....	57
3.5	Interpretação dos ensaios realizados com o DIP .....	63
3.5.1	Pré-processamento de dados – normalização e filtragem.....	63
3.5.2	Processo de retroanálise .....	66
3.5.3	Análise dos resultados.....	68
3.5.4	Consideração do efeito da temperatura .....	69
3.6	Comparação entre os resultados obtidos com o FWD e com o DIP .....	74
3.6.1	Módulo equivalente .....	74
3.6.2	Análise comparativa .....	74
3.6.3	Avaliação dos erros .....	80
3.7	Estudo de factores de influência na retroanálise.....	82
3.7.1	Efeito da normalização .....	82
3.7.2	Influência do erro de medição .....	89
3.8	Considerações finais.....	90
4	Análise Estrutural .....	93
4.1	Apresentação geral .....	93
4.2	Avaliação da capacidade de carga dos casos de estudo .....	93
4.2.1	Correção para a temperatura de projeto .....	93
4.2.2	Ação do tráfego .....	94
4.2.3	Cálculo das extensões .....	95
4.2.4	Critério de ruína .....	97
4.2.5	Cálculo da vida útil .....	97
4.2.6	Consideração da camada parcialmente descolada .....	100

4.3	Estudo Paramétrico .....	104
4.3.1	Consideração gerais .....	104
4.3.2	Dimensionamento de um pavimento novo .....	105
4.3.3	Comportamento estrutural equivalente .....	110
4.4	Considerações Económicas .....	113
4.5	Considerações finais.....	113
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	115
5.1	Conclusões.....	115
5.2	Desenvolvimentos futuros .....	117
6	Referências Bibliográficas .....	119
7	Anexos .....	123
7.1	Ensaio realizado com o FWD .....	123
7.1.1	Pré-processamento de dados com o FWD .....	123
7.1.2	Processo de retroanálise .....	136
7.1.3	Análise de resultados .....	146
7.2	Ensaio realizado com o DIP .....	151
7.2.1	Pré-processamento de dados.....	151
7.2.2	Processo de retroanálise .....	152
7.2.3	Análise de resultados .....	154
7.2.4	Efeito da temperatura .....	155
7.3	Efeito da normalização.....	158
7.4	Avaliação da capacidade de carga .....	160
7.5	Estudo paramétrico .....	167



## Índice de Quadros

Quadro 2.1 Características dos materiais de cada camada para cada tipo de pavimento [Costa, 2008] .....	6
Quadro 2.2 Valores típicos dos coeficientes de <i>Poisson</i> [Antunes, 1993; AASHTO,1986] .....	7
Quadro 2.3 Tipologia adotada para os materiais granulares [JAE,1995] .....	11
Quadro 2.4 Propriedades dos materiais granulares, ensaios e objetivos [Neves, 2007, citado por Costa, 2008] .....	12
Quadro 2.5 Características de deformabilidade dos materiais granulares [JAE, 1995] .....	13
Quadro 2.6 Tipologia adotada para as misturas com ligantes hidráulicos [JAE, 1995] .....	14
Quadro 2.7 Características mecânicas adotadas para as misturas com ligantes hidráulicos [JAE, 1995] .....	14
Quadro 2.8 Classificação das misturas betuminosas quanto à sua porosidade [JAE,1995] .....	16
Quadro 2.9 Designação das misturas betuminosas [Mendes, 2011; CE EP, 2009b; CE EP, 2009c] .....	17
Quadro 2.10 Requisitos para os valores de porosidade [CE EP, 2009] .....	18
Quadro 2.11 Principais critérios usados no fendilhamento por fadiga [Fontul, 2004] .....	38
Quadro 2.12 Principais critérios para leis de deformação permanente [Fontul, 2004] .....	39
Quadro 3.1 Deflexões obtidas pelo Deflectómetro de Impacto (FWD) para a célula 2 à temperatura 17°C .....	50
Quadro 3.2 Módulos de Deformabilidade E (MPa) para a célula 2 .....	53
Quadro 3.3 RMS do ponto à distância 0,90 m na célula 2 .....	53
Quadro 3.4 Módulo de Deformabilidade E (MPa) para a célula 3, considerando ligação total .	58
Quadro 3.5 Módulo de Deformabilidade E (MPa) para a célula 3 (considerando camada desligada) .....	60
Quadro 3.6 Comparação dos E1 e E2 obtidos considerando a camada betuminosa ligada vs desligada .....	62
Quadro 3.7 Resultados dos ensaios do DIP para a célula 2 .....	64
Quadro 3.8 Medições realizadas em ambas as campanhas com o DIP .....	65
Quadro 3.9 Deflexões medidas pelo DIP, normalizadas para 15 kN, e calculadas pelo BISAR ...	67
Quadro 3.10 Módulos de Deformabilidade E (MPa) para o DIP a 15 kN .....	68
Quadro 3.11 Medições feitas pelo DIP e normalizadas para 15 e 25 kN .....	75
Quadro 3.12 Módulos de Deformabilidade Equivalentes para 25 kN (DIP e FWD) .....	76
Quadro 3.13 Erros em % dados em função dos módulos equivalentes .....	81

Quadro 3.14 Normalização das deflexões D1 ( $\mu\text{m}$ ) medidas para 25 e 75 kN para as várias forças.....	83
Quadro 3.15 Erros, em %, das normalizações feitas para D1 .....	85
Quadro 3.16 Cálculo do RMS das Normalizações de D1 .....	85
Quadro 3.17 Médias dos Erros (%) de normalização do D1 ordenadas pela diferença das forças .....	86
Quadro 3.18 Cálculo do RMS da Normalização do DIP .....	89
Quadro 3.19 Gama de valores obtidos tendo em conta uma margem de erro de 5%.....	90
Quadro 4.1 Módulo de Deformabilidade E1 (MPa) corrigido para a temperatura de projeto de 20°C .....	94
Quadro 4.2 Extensões ( $\epsilon$ ) obtidas para o eixo padrão de 130 kN na célula 2.....	96
Quadro 4.3 Cálculo do Período de vida útil para a célula 2 para 25 kN.....	98
Quadro 4.4 Resumo do cálculo dos períodos de vida útil.....	99
Quadro 4.5 Extensões obtidas para o eixo padrão N <sub>130</sub> da célula 3, considerando a camada ligada .....	101
Quadro 4.6 Cálculo do período de vida útil para a célula 3, considerando a camada ligada ...	101
Quadro 4.7 Período de vida útil para a célula 3, considerando a camada ligada .....	102
Quadro 4.8 Erro do P <sub>dim</sub> da célula 3 considerando ligada e desligada .....	103
Quadro 4.9 Erros associados à comparação da força 25 kN com as outras .....	104
Quadro 4.10 Valores dos módulos das camadas e de espessuras para a hipótese A.....	107
Quadro 4.11 Valores dos módulos das camadas e de espessuras para a hipótese B.....	107
Quadro 4.12 Valores para a hipótese C .....	108
Quadro 4.13 Períodos de vida útil para a hipótese A .....	109
Quadro 4.14 Períodos de vida útil para a hipótese B.....	109
Quadro 4.15 Períodos de vida útil para a hipótese C.....	109
Quadro 4.16 Módulos das diferentes camadas adoptadas para as hipóteses 1, 2, 3 e 4.....	110
Quadro 4.17 Período de vida útil para a hipótese 1 .....	111
Quadro 4.18 Períodos de vida útil para as hipóteses 2,3 e 4.....	112
Quadro 4.19 Período de vida útil para a célula 2 .....	112
Quadro 4.20 Custo do material utilizado .....	113
Quadro 7.1 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 ..	136
Quadro 7.2 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 ..	137
Quadro 7.3 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 ..	138
Quadro 7.4 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 ..	139
Quadro 7.5 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 ..	140



Quadro 7.6 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 ..	141
Quadro 7.7 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3 c. desligada, alinhamento 1 .....	142
Quadro 7.8 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3 c. desligada, alinhamento 2 .....	143
Quadro 7.9 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 ..	144
Quadro 7.10 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2	145
Quadro 7.11 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 1 a 15 kN.....	152
Quadro 7.12 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 1 a 25 kN.....	153
Quadro 7.13 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 2 a 15 kN.....	153
Quadro 7.14 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 2 a 25 kN.....	154
Quadro 7.15 Módulos de deformabilidade dados e corrigidos para as duas campanhas.....	155
Quadro 7.16 Módulos de deformabilidade obtidos para o DIP 1 .....	156
Quadro 7.17 Módulos de deformabilidade obtidos para o DIP 2 .....	157
Quadro 7.18 Erros de Normalização de D2 ordenados para as diferentes células.....	159
Quadro 7.19 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 50 kN .....	160
Quadro 7.20 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 75 kN .....	161
Quadro 7.21 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 90 kN .....	162
Quadro 7.22 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 120 kN .....	163
Quadro 7.23 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os Pdim da C3 considerada ligada .....	164
Quadro 7.24 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, o DIP 1 a 15 kN.....	165
Quadro 7.25 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, o DIP 1 a 25 kN.....	166
Quadro 7.26 Valores completos para a hipótese A .....	167
Quadro 7.27 Valores completos para a hipótese B.....	167
Quadro 7.28 Valores completos para a hipótese C.....	167
Quadro 7.29 Períodos de vida úteis medianos para todas as células ensaiadas pelo FWD .....	168



## Índice de Figuras

Figura 2.1 Exemplo de diferentes variedades de solos granulares.....	8
Figura 2.2 Carga Estática com Placa [Govind, 2010; adaptado de Pestana, 2008] .....	19
Figura 2.3 Viga de Benkelman [SOLOCAP, 2012] .....	20
Figura 2.4 Ensaio com o Defletógrafo LNEC utilizando a Viga de Benkelman [FRESAGEM, 2012] .....	21
Figura 2.5 Curvímetro [Govind, 2010; adaptado de Alves, 2007] .....	22
Figura 2.6 Rolling Wheel Deflectometer [Govind, 2010; adaptado de Andrén, 2006] .....	24
Figura 2.7 Traffic Speed Defletometer e sistema de montagem [Jenkins, 2004] .....	25
Figura 2.8 Dynaflect [adaptado de Govind, 2010] .....	25
Figura 2.9 Deflectómetro de Impacto (FWD) do LNEC.....	26
Figura 2.10 Geofones do Deflectómetro de Impacto .....	27
Figura 2.11 Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP) .....	29
Figura 2.12 Massa, amortecedores e placa de carga do DIP .....	30
Figura 2.13 Radar de Prospeção (RADAR) [LNEC, 2011].....	32
Figura 2.14 Funcionamento do RADAR [LNEC, 2011] .....	33
Figura 2.15 Pontos críticos e sinalização dos dois tipos de fadiga considerados pela AASHTO [Dias,2009] .....	37
Figura 2.16 Indicação dos pontos críticos para a deformação permanente [Dias, 2009] .....	40
Figura 2.17 <i>Modelo de Boussinesq</i> para uma carga pontual [Fontul, 2004].....	41
Figura 2.18 <i>Método de Odemark</i> [Fontul, 2004].....	42
Figura 3.1 Esquema do modelo físico das quatro células .....	47
Figura 3.2 Composição da célula 2.....	47
Figura 3.3 Deflexões medidas na célula 2, normalizadas para uma carga de 25 kN .....	50
Figura 3.4 Retroanálise da célula 2 para 25 kN à distância 0,90m.....	52
Figura 3.5 Módulos de Deformabilidade da célula 2, para 25 kN.....	54
Figura 3.6 Módulo de Deformabilidade da célula 2 para a distância de 0,90 m.....	54
Figura 3.7 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1) para a célula 2.....	55
Figura 3.8 Módulos de Deformabilidade (MPa) da segunda camada (E2) para a célula 2 .....	55
Figura 3.9 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 1 .....	56
Figura 3.10 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 3 .....	56
Figura 3.11 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 4 .....	56
Figura 3.12 Deflexões obtidas na célula 3, para uma força de 50 kN .....	57
Figura 3.13 Módulos de Deformabilidade da célula 3 à distância 0,90 m, camada ligada .....	59

Figura 3.14 BISAR, camada desligada.....	60
Figura 3.15 Módulo de Deformabilidade da camada 1, com a força de 50 kN considerando camada ligada e desligada .....	61
Figura 3.16 Módulo de Deformabilidade da camada 2, com a força de 50 kN considerando camada ligada e desligada .....	61
Figura 3.17 Deflexões medidas e calculadas - Célula 1 .....	66
Figura 3.18 Deflexões medidas e calculadas - Célula 2 .....	66
Figura 3.19 Deflexões medidas e calculadas - Célula 3 .....	66
Figura 3.20 Deflexões medidas e calculadas - Célula 4 .....	66
Figura 3.21 Módulos de Deformabilidade para E1 e E2 para o DIP 15 kN .....	68
Figura 3.22 Módulos de deformabilidade dados pelo DIP para as duas campanhas .....	70
Figura 3.23 Módulos de deformabilidade dados pelo DIP e corrigidos para 20°C .....	70
Figura 3.24 Módulos de Deformabilidade dados pelo DIP .....	71
Figura 3.25 Módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR para as duas campanhas .....	72
Figura 3.26 Módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR e corrigidos para 20°C..	72
Figura 3.27 Módulos de Deformabilidade retroanalizados pelo BISAR para as duas campanhas .....	73
Figura 3.28 Módulos medido pelo DIP e módulos equivalentes (FWD e DIP) para 25 kN – Célula 2.....	76
Figura 3.29 Módulo de Deformabilidade para o FWD a 25 kN – Célula 2 .....	77
Figura 3.30 Módulos de deformabilidade para o DIP e FWD – Célula 2 .....	77
Figura 3.31 Módulos de Deformabilidade obtidos e calculados através do DIP .....	78
Figura 3.32 Módulos de Deformabilidade calculados através do FWD .....	78
Figura 3.33 Módulo de Deformabilidade dado pelo DIP vs o Módulo Equivalente calculado para o FWD.....	79
Figura 3.34 Módulo dado pelo DIP vs o Módulo estimado pelo BISAR calculado para o FWD ..	79
Figura 3.35 Módulo Equivalente calculado para o ensaio FWD vs o Módulo estimado pelo BISAR .....	80
Figura 3.36 Erros obtidos para as comparações feitos para o ensaio do FWD.....	82
Figura 3.37 Normalização da força de 25 kN para a célula 2 .....	84
Figura 3.38 Normalização D1 de 25 para 50 kN para a célula 2.....	86
Figura 3.39 Erros da normalização de D1 obtidos nas diferentes células.....	87
Figura 3.40 Erros da normalização de D1 para os mesmos intervalos de valores (25 e 50 kN) .	87
Figura 3.41 Erros da normalização de D2 obtidos nas diferentes células.....	88

Figura 3.42 Erros da normalização de D2 para os mesmos intervalos de valores (25 e 50 kN) .	88
Figura 4.1 Modelo de carregamento para um eixo padrão de 130 kN .....	95
Figura 4.2 Período de vida útil para as células ensaiadas .....	100
Figura 4.3 Estrutura do pavimento [Silva e Fontul, 2010] .....	106
Figura 4.4 Estimativas para os módulos de deformabilidade das camadas de material granular2 .....	108
Figura 4.5 Períodos de vida úteis para as diferentes hipóteses.....	110
Figura 4.6 Progressão do período de vida útil para a hipótese 1.....	111
Figura 4.7 Períodos de vida útil medianos para a célula 2.....	112
Figura 7.1 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 25 kN .....	123
Figura 7.2 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 50 kN .....	123
Figura 7.3 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 75 kN .....	123
Figura 7.4 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 90 kN .....	124
Figura 7.5 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 120 kN .....	124
Figura 7.6 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 25 kN .....	124
Figura 7.7 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 50 kN .....	125
Figura 7.8 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 75 kN .....	125
Figura 7.9 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 90 kN .....	125
Figura 7.10 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 120 kN .....	126
Figura 7.11 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 25 kN .....	126
Figura 7.12 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 50 kN .....	126
Figura 7.13 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 75 kN .....	127
Figura 7.14 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 90 kN .....	127
Figura 7.15 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 120 kN .....	127
Figura 7.16 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 25 kN .....	128
Figura 7.17 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 50 kN .....	128
Figura 7.18 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 75 kN .....	128
Figura 7.19 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 90 kN .....	129
Figura 7.20 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 120 kN .....	129
Figura 7.21 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 25 kN .....	129
Figura 7.22 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 50 kN .....	130
Figura 7.23 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 75 kN .....	130
Figura 7.24 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 90 kN .....	130
Figura 7.25 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 120 kN .....	131

Figura 7.26 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 25 kN .....	131
Figura 7.27 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 50 kN .....	131
Figura 7.28 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 75 kN .....	132
Figura 7.29 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 90 kN .....	132
Figura 7.30 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 120 kN .....	132
Figura 7.31 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 25 kN .....	133
Figura 7.32 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 50 kN .....	133
Figura 7.33 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 75 kN .....	133
Figura 7.34 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 90 kN .....	134
Figura 7.35 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 90 kN .....	134
Figura 7.36 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 25 kN .....	134
Figura 7.37 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 50 kN .....	135
Figura 7.38 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 75 kN .....	135
Figura 7.39 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 90 kN .....	135
Figura 7.40 Medições (em $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 120 kN .....	136
Figura 7.41 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 0,90 m, alinhamento 1 .....	146
Figura 7.42 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 1,75 m, alinhamento 1 .....	146
Figura 7.43 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 2,65 m, alinhamento 1 .....	146
Figura 7.44 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 3,55 m, alinhamento 1 .....	147
Figura 7.45 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 4,30m, alinhamento 1 .....	147
Figura 7.46 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, da camada 1, alinhamento 1 .....	147
Figura 7.47 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, da camada 1, alinhamento 2 .....	148
Figura 7.48 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2, da camada 1, alinhamento 1 .....	148
Figura 7.49 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2, da camada 1, alinhamento 2 .....	148
Figura 7.50 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3, da camada 1, alinhamento 1 .....	149
Figura 7.51 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3, da camada 1, alinhamento 2 .....	149
Figura 7.52 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3 c. desligada, da camada 1, alinhamento 1 .....	149

Figura 7.53 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3 c. desligada, da camada 1, alinhamento 2.....	150
Figura 7.54 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 4, da camada 1, alinhamento 1 .....	150
Figura 7.55 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 4, da camada 1, alinhamento 2 .....	150
Figura 7.56 Retroanálise da célula 1, a 15 kN, pelo DIP 2 .....	151
Figura 7.57 Retroanálise da célula 2, a 15 kN, pelo DIP 2 .....	151
Figura 7.58 Retroanálise da célula 1, a 25 kN, pelo DIP 2 .....	151
Figura 7.59 Retroanálise da célula 2, a 25 kN, pelo DIP 2 .....	152
Figura 7.60 Módulos de Deformabilidade medidos pelo DIP 2, para 15 kN .....	154
Figura 7.61 Módulos de Deformabilidade medidos pelo DIP 2, para 25 kN .....	155
Figura 7.62 Módulos de Deformabilidade dados pelo DIP para a célula 1 .....	157
Figura 7.63 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para a célula 1 .....	158
Figura 7.64 Normalização da força de 75 kN para a célula 2 .....	158
Figura 7.65 Normalização D1 de 75 para 25 kN para a célula 2.....	158
Figura 7.66 Normalização D2 da força 25 para 50 kN da célula 2.....	159
Figura 7.67 Normalização D2 da força 75 para 25 kN da célula 2.....	159
Figura 7.68 Módulos de Deformabilidade Normalizados Estimados pelo BISAR para 25 kN ...	166
Figura 7.69 Balanço da vida útil mediana para todas as células ensaiadas pelo FWD .....	168





## **Lista de Siglas**

AASHO - *American Association of State Highway Officials;*  
AASHTO - *American Association of State Highway and Transport Officials;*  
ABGE – *Agregado Britado de Granulometria Extensa;*  
AIPCR – *Association Mondiale de la Route/World Road Association;*  
ASTM – *American Society for Testing and Materials;*  
BISAR – *Bitumen Stress Analysis in Road;*  
CBR – *Californian Bearing Ratio;*  
DIP – *Deflectómetro de Impacto Ligeiro;*  
ECP – *Ensaio de Carga Estática com Placa;*  
FHWA – *Federal Highway Administration;*  
FWD – *Falling Weight Deflectometer;*  
GPR – *Ground Penetrating Radar;*  
GPS – *Global Positioning System;*  
HSD – *High Speed Deflectograph;*  
HFWD – *Heavy Falling Weight Deflectometer;*  
Super HFWD – *Super Heavy Falling Weight Deflectometer;*  
JAE – *Junta Autónoma de Estradas;*  
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées;*  
LDW – *Light Drop Weight;*  
LFD – *Light Falling Deflectometer;*  
LFWD – *Light Falling Weight Deflectometer;*  
LNEC – *Laboratório Nacional de Engenharia Civil;*  
LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*  
NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program;*  
NP – *Norma Portuguesa;*  
PDA – *Personal Digital assistant;*  
PFWD – *Portable Falling Weight Deflectometer;*  
RADAR – *Radio Detecting and Ranging;*  
RDT – *Road Deflection Tester;*  
RMS – *Valor quadrático médio (root mean square);*  
RWD – *Rolling Wheel Deflectometer;*  
SHELL – *Shell International Petroleum Company Limited;*  
TSD – *Traffic Speed Defletometer;*

TRL – *Transport Research Laboratory*.

## Simbologia

A – Área [m<sup>2</sup>];

C – Fendilhamento;

C<sub>H</sub> – Fendilhamento do tipo “bottom-up” ou “top-down”;

D - Rigidez de Flexão;

D<sub>1-9</sub> – Deflexões medidas pelos geofones, do centro para fora respectivamente [μm];

dci – Deflexão calculada no sismómetro i [μm];

dmi – Deflexão medida no sismómetro i [μm];

E - Módulo de Deformabilidade [MPa];

E<sub>1-4</sub> – Módulo de Deformabilidade das diversas camadas 1-4 [MPa];

F - Força medida no ensaio [kN];

h – Espessura da camada [mm];

H<sub>e</sub> - Espessura equivalente [mm];

H<sub>HMA</sub> – Espessura total das camadas betuminosas [mm];

IP – Índice de Plasticidade;

L – Distância entre as rodas do eixo padrão [mm];

M – Potência da equação (2.8);

M<sub>r</sub> - Módulo Resiliente [MPa];

α – Fator de Agressividade;

n – Porosidade [%]; número total de sismómetros utilizados;

N<sub>130</sub> – Número Admissível de passagens do eixo padrão 130 kN;

N<sub>c</sub> - Número Admissível de passagens de eixo padrão para critério de deformação permanente;

N<sub>t</sub> - Número Admissível de passagens de eixo padrão para critério de fadiga;

P<sub>dim</sub> – Período de vida útil [anos];

r – Raio [mm];

T – Temperatura [°C];

t – Taxa de crescimento [%];

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual de Pesados [veículos];

V<sub>a</sub> – Percentagem volumétrica de Agregado;

V<sub>b</sub> – Percentagem volumétrica de Betume;

V<sub>beff</sub> - Percentagem volumétrica efetiva de betume;

V<sub>v</sub> – Percentagem volumétrica de vazios;

XX e YY – Deflexões radiais para a base da camada de mistura betuminosa [μm];

$\Delta Z$  – Deflexão para o topo da camada de solo de fundação [ $\mu\text{m}$ ];

$\epsilon_c$  - Extensão máxima vertical de compressão no topo da camada de solo de fundação [ $\mu\text{m}$ ];

$\epsilon_t$  - Extensão máxima horizontal de tração na base das camadas betuminosas [ $\mu\text{m}$ ];

$\epsilon_z$  - Extensão máxima vertical de compressão no topo da fundação [ $\mu\text{m}$ ];

$\nu$  - Coeficiente de Poisson;

$\sigma_o$  - Tensão constante sob a placa de carga [kPa];

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – Tensões principais [kPa];

$\sigma_d$  - Tensão deviatória [kPa];

$\omega_L$  – Limite de Liquidez;

$\omega_P$  – Limite de Plasticidade;

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Com o desenvolvimento dos aglomerados populacionais, as infraestruturas rodoviárias têm sido alvo de grande atenção e preocupação, quer no que respeita ao traçado quer com o eventual estado de conservação e, por isso, verifica-se a necessidade de estudar a otimização das metodologias a adotar para uma correta avaliação da qualidade das vias de comunicação. Para isso, tem de haver um adequado conhecimento da estrutura existente, de modo a que possa ser proposta a melhor solução a aplicar para a sua reabilitação e eventual reforço. Como tal, existem inúmeros equipamentos de ensaio aptos para caracterizar a estrutura de um pavimento. Contudo, por vezes, os equipamentos utilizados não são os mais indicados para cada caso, sendo conveniente que existam critérios que permitam selecionar os mais indicados para cada tipo de estrutura, de modo a permitir uma maior rapidez e eficácia na análise do comportamento da infraestrutura.

Presentemente são cada vez mais usados métodos de auscultação não destrutivos, em infraestruturas rodoviárias, devido ao seu fácil manuseamento e preservação da integridade das estruturas, em associação com um reduzido tempo de ensaio.

Um dos principais objetivos para a realização de ensaios não destrutivos no âmbito da avaliação da capacidade de carga é o estabelecimento do modelo de comportamento estrutural do pavimento. Geralmente, os modelos de cálculo mais utilizados na análise estrutural são modelos de camadas elásticas lineares.

## 1.2 Objetivo

O principal objetivo desta dissertação é de contribuir para a avaliação do comportamento das infraestruturas de transporte, através da utilização de equipamentos de ensaios de carga, de carácter não destrutivo e estabelecer parâmetros caracterizadores do comportamento dos materiais aplicados nas diferentes estruturas de pavimento. De um modo geral, tenta-se identificar quais os equipamentos de ensaio mais adequados para cada tipo de material e consequentemente para cada tipo de estrutura de pavimento.

Para o caso de estudo desenvolvido nesta dissertação, foram selecionados dois equipamentos, o Deflectómetro de Impacto (*FWD*) e o Deflectómetro de Impacto Portátil (*DIP*) que, para além de serem os equipamentos disponíveis no LNEC, são bastante utilizados a nível nacional e internacional para este tipo de avaliação de pavimentos.

Os pavimentos objeto de caracterização no caso de estudo compreendem quatro estruturas experimentais diferentes, designadas por células, uma constituída apenas por material granular, as restantes três constituídas por camadas de mistura betuminosa, com espessuras diferentes para cada célula. Paralelamente, é estudada a influência de vários parâmetros e condições de ensaios sobre os resultados obtidos, como por exemplo a força aplicada e a temperatura de ensaio, para as diversas células estudadas, sendo estimados os respetivos períodos de vida útil.

Em última análise, são estudadas soluções estruturais economicamente e ambientalmente mais adequadas para eventual utilização em infraestruturas novas.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está dividida em 8 capítulos.

O primeiro capítulo aborda a envolvente do tema estudado e a sua finalidade, o enquadramento do estudo a realizar e o seu propósito.

No segundo capítulo apresentam-se brevemente os diversos tipos de materiais a aplicar em infraestruturas de transportes, nomeadamente solos, materiais granulares e misturas betuminosas, sendo apresentadas as suas principais características, e os ensaios usualmente realizados para a caracterização de cada um deles.

O terceiro capítulo retrata as metodologias de ensaio geralmente aplicadas na avaliação estrutural de pavimentos. Isto é, fala-se do processo de avaliação de uma infraestrutura de transportes e da evolução histórica desse processo. Abordam-se os diversos equipamentos de ensaio utilizados para o estudo do comportamento dos pavimentos, e são explicados os dois critérios de ruína fundamentais para o estudo de pavimentos, nomeadamente a resistência à fadiga e resistência à deformação permanente. Posteriormente são abordados novos métodos de avaliação dos critérios de ruína. Por fim, é explicada a modelação feita dos pavimentos, usada neste estudo.

No capítulo quatro, correspondente ao caso de estudo desenvolvido, é efetuada a introdução dos pavimentos reproduzidos em modelo físico, a avaliação das medições realizadas e por fim, é efetuada a análise dos resultados estão apresentadas as principais conclusões alcançadas.

No capítulo cinco, apresenta-se uma análise estrutural dos pavimentos. Isto é, com o estudo das estruturas base, são propostas novas abordagens para comparação. São calculados

os períodos de vida útil de várias infraestruturas propostas, a qualidade de cada pavimento e por fim, são efetuadas associações e comparações entre os vários pavimentos.

Após a análise dos elementos apresentados, são tecidas considerações económicas às conclusões retiradas deste estudo.

O capítulo seis sintetiza todas as análises abordadas ao longo do estudo, sendo apresentadas as principais conclusões alcançadas.

No capítulo sete encontram-se as referências bibliográficas em que se baseou o presente trabalho.

Por último, no capítulo oito, que constitui os anexos, são apresentados os vários cálculos realizados durante o desenvolvimento do caso de estudo e que suportaram as conclusões alcançadas.





## **2 Procedimento de avaliação estrutural**

### **2.1 Introdução**

O dimensionamento estrutural de um pavimento novo ou a avaliação estrutural de um pavimento em serviço, tendo em vista o eventual reforço da sua capacidade de carga, é normalmente efetuado através da definição de um modelo de comportamento estrutural utilizando métodos racionais que têm em consideração as características das solicitações, das propriedades dos materiais constituintes, da respetiva estrutura e as condições climáticas locais.

Os critérios de dimensionamento adotados para as infraestruturas de transportes fundamentam-se na verificação da resistência considerando os estados de tensão e de deformação nas camadas constituintes e no solo de fundação para uma determinada solicitação de tráfego.

No presente capítulo são apresentados os principais materiais que constituem os pavimentos flexíveis, os métodos de avaliação da capacidade de carga e os equipamentos de ensaio utilizados para a caracterização *in situ* do seu desempenho.

São referenciados também os critérios de ruína a adotar, e as metodologias de modelação do comportamento de pavimentos.

### **2.2 Constituição de pavimentos flexíveis**

#### **2.2.1 Considerações gerais**

Na conceção e posterior construção de uma infraestrutura de transporte deve ser tida em conta o tipo de material a aplicar em cada uma das camadas constituintes, função das solicitações a que esta irá ser submetida. Deste modo, a relação tensão/deformação dos materiais constituintes das diferentes camadas é bastante importante, permitindo o estabelecimento de um modelo de cálculo bastante real.

Em função dos diferentes tipos de camadas que constituem os pavimentos, estes podem ser classificados como pavimentos flexíveis, rígidos ou semirrígidos.

No Quadro 2.1 apresentam-se os materiais normalmente usados em cada camada para os diferentes tipos de pavimentos, bem como as espessuras que as camadas usualmente apresentam.

**Quadro 2.1 Características dos materiais de cada camada para cada tipo de pavimento [Costa, 2008]**

Camada	Material		
	Pavimento Flexível	Pavimento Semirrígido	Pavimento Rígido
Desgaste	Misturas Betuminosas	Misturas Betuminosas	Betão de Cimento Portland
Regularização	Misturas Betuminosas	Misturas Betuminosas	-
Base	Misturas Betuminosas Materiais Granulares	Materiais Granulares ligados com Cimento Portland	-
Sub-base	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Batão Pobre Solo-Cimento Materiais Granulares estabilizados com Cimento
Leito do Pavimento	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados

Tendo em vista o tipo de comportamento dos materiais constituintes dos pavimentos, abordam-se, de forma sucinta os solos de fundação, as misturas betuminosas e os materiais tratados com ligantes hidráulicos, para uma melhor definição da sua função:

- os solos e materiais granulares não tratados, tem um comportamento não linear, isto é, o seu módulo de deformabilidade depende do respetivo estado de tensão. Podemos ainda separar este grupo em 2 tipos de comportamento distinto, uns que são caracterizados pela relação entre os módulos de deformabilidade, e os outros que são caracterizados pelo seu estado de tensão, consoante se trate de solos finos ou solos granulares e granulares britados. Independentemente do estado de tensão, no caso dos solos finos, o seu comportamento poderá depender também do tempo de atuação das cargas;

- as misturas betuminosas, cujas propriedades são condicionadas pelo seu comportamento viscoelástico, consoante a temperatura e o tempo de atuação das cargas;

- as misturas com ligantes hidráulicos, caracterizadas pelo seu comportamento elástico-linear para os níveis de tensão a que geralmente são sujeitos num pavimento.

Na maior parte dos modelos de utilização corrente na análise estrutural de pavimentos, os materiais que constituem as camadas apresentam um comportamento elástico-linear, que se pode considerar válido para determinadas condições, e que tem em conta designadamente, as condições ambientais, as velocidades de circulação, etc.. No entanto, existem vários programas de cálculo automático baseados em modelos estruturais que permitem a consideração de comportamentos não lineares.

Para estabelecer um modelo de comportamento estrutural de um pavimento que se assemelhe ao caso real, é necessário conhecer a espessura de cada camada, o seu módulo de

deformabilidade e o coeficiente de *Poisson*. Admitindo que o coeficiente de *Poisson* não tem grande variação dentro da mesma gama de materiais, é fixado um valor típico para cada material.

No Quadro 2.2 encontram-se a gama de valores considerados típicos para os materiais geralmente usados em pavimentos [Antunes, 1993; AASHTO, 1986].

**Quadro 2.2 Valores típicos dos coeficientes de *Poisson* [Antunes, 1993; AASHTO,1986]**

Material	Gama de Valores	Valor típico	Observações
Misturas Betuminosas	0,15 – 0,45	0,35 – 0,40	Depende da temperatura (valores mais baixos correspondem a temperaturas baixas)
Betão de Cimento	0,10 – 0,20	0,15	
Agregado tratado com Cimento	0,15 – 0,30	0,25	Valores mais elevados correspondem a materiais fendilhados
Materiais Granulares	0,30 – 0,40	0,35	
Solos	0,30 – 0,50	0,40	0,30 – solos não coesivos 0,50 – solos coesivos

### 2.2.2 Solos

Para uma adequada caracterização dos solos a aplicar em infraestruturas rodoviárias é necessário ter em conta o seu módulo de deformabilidade, que depende de alguns fatores importantes como o estado de tensão, as características do carregamento, a anisotropia, o estado de compactidade, o teor em água, entre outros.

Normalmente, a determinação desse módulo é realizada em laboratório através de ensaios em câmaras triaxiais, com aplicação de cargas repetidas, sobre amostras intactas ou sobre provetes moldados em condições semelhantes verificadas em obra.

Na Figura 2.1, estão apresentadas alguns tipos de solos granulares.



Figura 2.1 Exemplo de diferentes variedades de solos granulares

Com estes ensaios, pode-se verificar a existência de duas parcelas de deformação axial, no comportamento do material, devido aos ciclos carga/descarga. Há primeiramente uma deformação permanente seguida de uma parcela de deformação reversível (ou elástica). Constata-se, de uma forma geral, que, para tensões deviatórias inferiores a um dado valor limite, à medida que aumenta o número de ciclos de carga/descarga, o acréscimo de deformação permanente em cada ciclo vai diminuindo, aproximando-se os comportamentos obtidos na carga e na descarga. Por outro lado, os níveis de tensões induzidos no solo pela ação da passagem dos veículos sobre um pavimento, são relativamente baixos, quando comparados com os outros tipos de estruturas.

Acresce ainda que, os critérios para a verificação da resistência às deformações permanentes, são geralmente expressos em função da deformação elástica (ou reversível). Assim o módulo de deformabilidade, que interessa conhecer, é o que corresponde às deformações reversíveis, também designado por módulo resiliente,  $M_r$  [Antunes, 1993]:

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.1)$$

Sendo:  $\sigma_1, \sigma_3$  – tensões principais;

$\sigma_d$  - tensão deviatória;

$\varepsilon_r$  – Extensão radial.

Uma vez que a deformabilidade dos solos depende de muitos fatores, e o recurso a ensaios triaxiais nem sempre é possível, recorre-se a processos expeditos a partir de propriedades relativamente fáceis de determinar, como é o caso das correlações a partir da

classificação do solo, ou do seu CBR, através das equações propostas pela SHELL [Shell, 1978] e pelo *Transport Research Laboratory* (T.R.L.), [Powel, et al, 1984].

O Centre de *Recherches Routières* (Bélgica) [Centre de *Recherches Routières*, 1983] estabelece uma relação, que permite estimar o módulo de deformabilidade dos solos finos a partir do índice de plasticidade, IP [Antunes, 1993]:

$$E \text{ (MPa)} = 70 - IP \quad (2.2)$$

Sendo o índice de plasticidade a diferença entre o limite de liquidez ( $\omega_L$ ), o teor em água fronteira entre o estado de comportamento semissólido e o plástico, e o limite de plasticidade ( $\omega_P$ ), o teor em água fronteira entre o estado de comportamento plástico e o líquido:

$$IP = \omega_L - \omega_P \quad (2.3)$$

E representa a dimensão da gama de teores em água na qual o solo se encontra no estado plástico.

Como é evidente, estes limites de comportamento variam consoante o tipo de solo existente, e a sua determinação é feita com recurso às normas descritas na Norma Portuguesa NP-143 [Antão, 2009].

Normalmente, para projetos de pavimentos novos, o módulo do solo de fundação é calculado como base no CBR (“Californian Bearing Ratio”) da seguinte forma [JAE, 1995]:

$$E \text{ (MPa)} = 10 \times CBR \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Materiais granulares

Apesar do comportamento dos materiais granulares ser diferente do apresentado pelos solos finos, o seu comportamento mecânico, nomeadamente a avaliação das relações tensões/deformações podem ser estudadas da mesma forma, através da realização de ensaios triaxiais com cargas repetidas, constatando-se que o acréscimo da deformação permanente em cada ciclo tende para zero à medida que aumenta o número de ciclos de carga, para níveis de tensão bastante inferiores aos que introduzem [Antunes, 1993].

No caso de projetos de pavimentos novos, a estimativa do módulo de deformabilidade pode ser feita através das relações expeditas. Admite-se então, que esta grandeza depende do

módulo e da espessura da camada subjacente, uma vez que, quanto mais rígido for o apoio de uma determinada camada, mais fácil é a sua compactação adequada [Antunes, 1993].

$$E_{cg} = k \times E_{sf} \quad (2.5)$$

$$k = 0,2 \times h^{0,45}, 2 < k < 4 \quad (2.6)$$

Sendo  $k$  – coeficiente;

$E_{cg}$  – Módulo de deformabilidade da camada granular [MPa];

$E_{sf}$  – Módulo de deformabilidade para o solo de fundação [MPa];

$h$  – espessura da camada granular [mm].

Os materiais com esta designação são materiais naturais ou britados usados na construção das camadas base e sub-base, que podem ser tratados ou não. Podem ser de origem natural (areias, cascalheiras e rochas britadas), artificial (escórias industriais) e reciclados (resíduos de construção).

O comportamento dos materiais destas camadas depende, entre outros fatores, das suas características intrínsecas, designadamente: a natureza dos agregados (petrografia, textura); da forma dos agregados (lamelação e alongamento); das propriedades físicas dos agregados (porosidade, dureza, resistência ao desgaste, alterabilidade, etc.); da granulometria adotada (em particular, da percentagem de finos); e da quantidade de elementos britados.

Admite-se que em relação a estas características, se seja mais exigente nos materiais granulares britados destinados a camada de base (BG), relativamente às situações de utilização, seja de materiais britados (SbG) ou de materiais naturais (GN e SS), em camadas de sub-base [JAE, 1995].

O comportamento mecânico destas camadas, em particular o seu módulo de deformabilidade é ainda fortemente condicionado pelas condições de estado, nomeadamente da compacidade, o teor em água e o estado de tensão (função de estrutura de pavimento e das condições de fundação).

A fim de obter um bom comportamento mecânico, interessa que, em todo o processo construtivo se garanta a homogeneidade das propriedades, que é função não só da produção do material, bem como das operações necessárias para a sua colocação em obra (transporte, espalhamento e compactação) [JAE,1995].

Geralmente o seu processo de fabrico consiste em selecionar uma zona a explorar, seguindo-se a desmatização e decapagem, o desmonte da rocha e a carga e transporte da rocha para a central de britagem. Na central de britagem dá-se a britagem do material, seguindo-se a crivagem e posteriormente o armazenamento. Os mecanismos de britagem são consoante o aumento de energia aplicada, a abrasão (tensões localizadas), clivagem (compressão) e corte (impacto) [Costa, 2008].

A crivagem corresponde a uma seleção granulométrica e a sua qualidade é condicionada pelo estado do agregado (humidade), inclinação e frequência de vibração [Costa, 2008].

A tipologia adotada para os materiais granulares empregues em camadas de pavimentos, a que se associa os códigos estabelecidos nas rubricas de trabalhos rodoviários indicam-se no Quadro 2.3.

No Quadro 2.4 indicam-se as propriedades dos materiais, os ensaios utilizados para validação das mesmas e o objetivo de garantir estas propriedades.

**Quadro 2.3 Tipologia adotada para os materiais granulares [JAE,1995]**

Símbolo	Principais características
BGr	Material britado recomposto em central Granulometria extensa Dimensão máxima: 25 mm Equivalente de areia mínimo: 70 % Los Angeles máximo: 30 % (granulometria G)
BG	Material britado sem recomposição (tout-venant) aplicado em camada de base Granulometria extensa Dimensão máxima: 37,5 mm Equivalente de areia mínimo: 50 % Los Angeles máximo: 35 % (granulometria F)
SbG	Material britado sem recomposição (tout-venant) aplicado em camada de sub-base Granulometria extensa Dimensão máxima: 50 mm Equivalente de areia mínimo: 50 % Los Angeles máximo: 40 % (granulometria B)
GN	Material não britado Granulometria extensa Dimensão máxima: 75 mm Equivalente de areia mínimo: 30 % Los Angeles máximo: 40 % (granulometria B)
SS	Solo selecionado Índice de plasticidade $\leq 6$ % Limite de liquidez $\leq 25$ % CBR > 10 % (grau de compactação = 95 %; Proctor modificado) Equivalente de areia mínimo: 25 %

**Quadro 2.4 Propriedades dos materiais granulares, ensaios e objetivos [Neves, 2007, citado por Costa, 2008]**

Propriedades	Ensaio	Objetivo
Granulometria	Peneiração	Obter compacidade adequada
Forma das partículas	Índice de forma	Obter atrito interno elevado e boa resistência ao corte
Plasticidade dos finos	Limites de consistência	Obter atrito interno elevado e boa resistência ao corte
Resistência mecânica ao choque	Los Angeles	Partículas resistentes
Resistência à fragmentação	Micro-Deval	Partículas resistentes
Durabilidade	Sulfato de sódio Sulfato de magnésio	Partículas não alteráveis
Dureza	Los Angeles	Partículas resistentes
Limpeza do material	Equivalente de areia Azul de metileno	Material não contaminado por finos nocivos

Os materiais para camadas não ligadas incluem agregados britados (naturais e reciclados) de granulometria extensa, agregado fino e material drenante com agregado britado.

No caso dos materiais anteriormente referidos, para além dos requisitos definidos na NP EN 13242 Agregados para materiais ligados ou tratados com ligantes hidráulicos em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária, devem ser considerados os requisitos definidos na EN 13285 Unbound mixtures – Specification.

Em camada de base são usualmente aplicados: o agregado britado recomposto em central (BGr) e o agregado britado sem recomposição de granulometria extensa (tout-venant) (BG).

Em camada de sub-base utiliza-se: o agregado britado sem recomposição de granulometria extensa (tout-venant) (SbG); o agregado não britado (material aluvionar) (GN) e o solo selecionado (SS).

Todos os ensaios laboratoriais para caracterização destes materiais estão devidamente normalizados e em obra estes têm de obedecer a determinadas condições referidas no caderno de encargos aplicável.

Para efeitos de verificação do dimensionamento de pavimentos novos, são geralmente consideradas características mecânicas aproximadas para as camadas granulares como de indica a seguir no Quadro 2.5 [JAE,1995].



**Quadro 2.5 Características de deformabilidade dos materiais granulares [JAE, 1995]**

Código	Módulo de deformabilidade (E)	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )
BGr	$\approx 2,5 \times E$ camada inferior	0,35
BG	$\approx 2 \times E$ camada inferior	0,35
SbG	$\approx 2 \times E$ camada inferior	0,35
GN	$\approx 1,5 \times E$ camada inferior	0,35
SS	$\approx 1,2 \times E$ camada inferior	0,40

#### 2.2.4 Misturas com ligantes hidráulicos

O comportamento dos materiais ligados com ligantes hidráulicos pode ser considerado elástico-linear, desde que as tensões neles induzidas não ultrapassem valores da ordem de 55 a 70% da sua resistência [Antunes,1993; Pinelo, A.M., 1991].

O seu módulo de deformabilidade pode ser determinado através de ensaios laboratoriais de flexão, de compressão, de tração, ou de ultrassons, dependendo sempre de alguns fatores, como por exemplo, o tipo de inerte, a sua granulometria, a composição de mistura e especial destaque para o teor de cimento e a idade.

Têm-se módulos de deformabilidade relativamente elevados (15000 e 35000 MPa) no caso dos materiais de granulometria extensa tratados com cimento ou os betões pobres [Antunes,1993; Pinelo, A.M., 1991]. No caso do solo-cimento, o seu módulo de deformabilidade é mais baixo, variando sempre consoante o tipo de solo, teor em cimento e o estado de fissuração da camada.

No Quadro 2.6 apresentam-se as principais características das misturas com ligantes hidráulicos.

**Quadro 2.6 Tipologia adotada para as misturas com ligantes hidráulicos [JAE, 1995]**

Código	Principais Características
BC	Betão de cimento Betões das classes B4.0 e B4.5F previstas no RBLH
BP1	Betão pobre de reduzida erodibilidade (vibrado ou cilindrado) Dimensão máxima do agregado: 25 mm Teor de ligante: 140 kg/m <sup>3</sup> de mistura
BP2	Betão pobre (agregado recomposto em central) Dimensão máxima do agregado: 25 mm Teor de ligante: 90 – 110 kg/m <sup>3</sup> de mistura Resistência à tração em compressão diametral (28 dias) > 1MPa
AGEC	Mistura com agregado não recomposto em central Dimensão máxima do agregado: 37,5 mm Teor de ligante 90 – 110 kg/m <sup>3</sup> de mistura Resistência à tração em compressão diametral (28 dias) > 1MPa
Sc	Solo-cimento fabricado em central Resistência à tração em compressão diametral $\geq 0,3$ MPa (28 dias)

Relativamente a estes materiais, apresenta-se no Quadro 2.7 os seus módulos de deformabilidade e os seus valores de *Poisson*, geralmente utilizados.

**Quadro 2.7 Características mecânicas adotadas para as misturas com ligantes hidráulicos [JAE, 1995]**

Código	Módulo de Deformabilidade (MPa)	Coeficiente de <i>Poisson</i>
BC	30 000	0,20
BP1	20 000	0,25
BP2	20 000	0,25
AGEC	15 000	0,25
Sc	2 000	0,30

As misturas tratadas com ligantes hidráulicos devem obedecer aos requisitos das seguintes Normas Europeias: EN 14227-1 Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 1: Cement bound granular mixtures; EN 14227-10 Hydraulically bound mixtures –

Specifications – Part 10: Soil treated by cement e EN 14227-11 Hydraulically bound mixtures –  
Specifications – Part 11: Soil treated by lime.

### **2.2.5 Misturas betuminosas**

As misturas betuminosas são constituídas por agregados (80 a 85%), betume (8 a 13%) e ar, cujas propriedades dependem das proporções relativas destes componentes, assim como das características intrínsecas do betume e dos agregados [Neves, 2001].

No caso das misturas betuminosas, tanto a temperatura como o tempo de atuação das cargas, têm uma grande influência no comportamento mecânico deste material. Com as temperaturas elevadas, os betumes podem apresentar um comportamento viscoelástico ou mesmo plástico, condicionando as relações tensões/deformações da mistura betuminosa. Apesar de variar bastante o módulo de deformabilidade, podemos considerar que, para temperaturas intermédias e tempos de cargas baixos, este material tem um comportamento elástico-linear.

As misturas betuminosas fabricadas a quente, em geral, podem ser aplicadas em camadas com características de desgaste, de regularização ou de base, sendo as mais utilizadas nos pavimentos flexíveis.

Nas obras de pavimentação estes materiais são empregues, essencialmente, com os seguintes objetivos:

- Oferecer aos utentes uma superfície que permita a circulação em dadas condições de segurança, economia e conforto;
- Conferir a estrutura do pavimento resistência as ações do tráfego;
- Impermeabilizar as camadas do pavimento, limitando a entrada de água.

Para que as misturas se comportem de forma adequada, durante a construção e após a sua entrada em serviço, é necessário garantir características adequadas, designadamente no que se refere a:

- Trabalhabilidade;
- Deformabilidade;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à deformação permanente;
- Durabilidade, em particular para as camadas de desgaste (resistência ao envelhecimento e à ação da água).

No caso de se destinarem a camadas de desgaste, as misturas deverão, ainda, após aplicação, obedecer a requisitos adicionais, em aspetos relativos ao atrito, rugosidade e características óticas, essenciais à garantia de boas condições de segurança, economia e conforto.

De acordo com a Association Mondiale de la Route/World Road Association (AIPCR), as misturas betuminosas a quente podem ser classificadas, quanto à sua porosidade (Vv) em classes (Quadro 2.8).

**Quadro 2.8 Classificação das misturas betuminosas quanto à sua porosidade [JAE,1995]**

Porosidade	Classificação em 4 classes	Classificação em 3 classes
<5%	Mistura fechada	Mistura densa
5 -1 0%	Mistura semi-fechada	
10- 15%	Mistura semi-aberta	Mistura demi-densa
> 15%	Mistura aberta	Mistura aberta

Refletindo a nossa tradição construtiva, as misturas densas são as que geralmente mais são aplicadas. Nas camadas de desgaste e de regularização empregam-se misturas fechadas, e nas camadas de base, misturas semi-fechadas e semi-abertas.

A Norma Europeia EN 13108-1 especifica os requisitos para as misturas betuminosas do grupo do betão betuminoso, produzidas a quente, e deve ser utilizada em conjunto com as NP EN 13108-20 e NP EN 13108-21.

No Quadro 2.9 encontram-se as novas nomenclaturas das misturas betuminosas, adotadas na versão de 2009 do Caderno de Encargos de Estradas de Portugal, na sequência da aplicação da normalização europeia a este tipo de materiais.

**Quadro 2.9 Designação das misturas betuminosas [Mendes, 2011; CE EP, 2009b; CE EP, 2009c]**

Camada	Designação anterior	Designação atual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)
ligante – classe a definir ; base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar “base course”; bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é “binder course”, de espessura constante; reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é “regulating course”, de espessura variável; surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.		

No Quadro 2.10 encontram-se os requisitos relativamente à porosidade para as diversas misturas betuminosas, de acordo com a classificação apresentada anteriormente.

**Quadro 2.10 Requisitos para os valores de porosidade [CE EP, 2009]**

Requisitos / Propriedades	Unid.	Utilização						
		AC 32 (MB)	AC20(MB) .... MBR-BBM*	AC20 (MBAM)	AC16bin (MBAM)	AC14bin (BB) AC14reg (BB) AC14surf (BB)	PA12,5 (BBd)	MBA – BBA MBA- BBM
Especificidades de utilização		Calculada com base na baridade máxima teórica determinada pelo método do picnómetro de vácuo para a percentagem óptima de betume, ou pelo método geométrico.						
Porosidade média de um lote	%	4 - 8	3 – 8	2 - 8	2 - 7	3 - 7	22 - 32	12 - 20
Porosidade individual de cada tarolo	%	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9	≤ 9	22-24	12-22

\*AC20 (MB); AC20bin (MB); AC20bin (MBD); AC20reg (MB); AC20reg (MBD); AC10surf (mBBR); AC14surf (BBR); AC4 (AB); MBR-BBA; MBR-BBM.

As características mecânicas das misturas betuminosas dependem de vários fatores, dos quais se destacam: as características dos seus constituintes, a composição volumétrica; o tipo de betume; as condições de temperatura; e a velocidade de aplicação das cargas (circulação).

Através de estudos laboratoriais de formulação, ensaiam-se diferentes composições e/ou tipos de betume, tendo em vista a definição das condições de aplicação em obra.

A escolha das granulometrias, tipo de betume e composição das misturas, deve ter em conta as condições de temperatura da região onde vão ser aplicadas e as velocidades de circulação dos veículos pesados que as virão a solicitar.

## 2.3 Métodos de avaliação da capacidade de carga

### 2.3.1 Evolução histórica

Para se poder avaliar a capacidade de carga de uma infraestrutura de transporte, normalmente são usados métodos de auscultação não destrutivos, isto é, métodos que não necessitam de retirar amostras da estrutura para saber as suas propriedades e características, como por exemplo a espessura ou o tipo de material de cada camada [COST 325, 1997].

O primeiro ensaio a ser utilizado para a avaliação da capacidade de carga, e que ainda hoje é bastante utilizado, é o ensaio de Carga Estática com Placa (ECP), representado na Figura 2.2. Trata-se de um ensaio não destrutivo, que apareceu na década de 1940, e normalmente é utilizado como referência para avaliação da qualidade de construção nos cadernos de encargos e também como base de comparação com os outros equipamentos de ensaio realizados *in situ* e não destrutivos. Este ensaio consiste na obtenção de valores de módulos de deformabilidade equivalente, e consequentemente na obtenção de informação sobre a resistência de solos de fundação e de camadas de materiais granulares. Este aparelho é constituído por uma placa rígida, circular ou quadrada, com varias dimensões e diferentes graus de rigidez, um sistema hidráulico para a transmissão de carga, uma célula para medir a carga aplicada, um ou mais transdutores colocados na zona central e/ou em pontos equidistantes do centro da placa de carga, e uma estrutura de referência para a medição de assentamentos diferenciais entre a zona carregada e uma zona sem influência do carregamento, conforme ilustrado na Figura 2.2. Um sistema de reação, constituído por exemplo por uma viga fixa ao terreno, serve de apoio ao sistema hidráulico de carregamento de modo a assegurar a direção, sentido e intensidade das cargas aplicadas [Pestana, 2008; Govind, 2010; Tangarrinha, 2012].



Figura 2.2 Carga Estática com Placa [Govind, 2010; adaptado de Pestana, 2008]

Este ensaio tem a particularidade de poder ser realizado à superfície ou a uma determinada profundidade estabelecida, e consiste na aplicação de ciclos de carga e descarga da placa rígida assente sobre a superfície de ensaio. O carregamento pode ser aplicado por patamares de carga com ou sem alteração da intensidade de carga. Tem ainda a possibilidade de fazer vários tipos de ensaios, como por exemplo, ensaio lento, rápido, misto, cíclico, e com taxa de penetração constante.

No caso do ensaio rápido de Carga Estática com Placa utilizado pelo LCPC são aplicados dois patamares de carregamento utilizando uma placa circular de 600 mm de diâmetro. É induzido o carregamento até 250 kPa, seguido de descarga total e carga para patamar de 200 kPa. A estabilização dos assentamentos ocorre quando na relação deformação-tempo a curva se torna de declive nulo. Os assentamentos da placa medidos nos dois patamares de carga permitem obter os módulos de deformabilidade equivalente e, através do parâmetro da relação desses diferentes módulos de deformabilidade, calcula-se a eficiência de compactação [Pestana, 2008].

Nos anos 50 apareceu a Viga de Benkelman, desenvolvida por Benkleman, exemplificada na Figura 2.3, que permite caracterizar o tipo de pavimento no âmbito de ensaios AASHO [Antunes, 1993]. É através de um deflectómetro mecânico que é medida uma única deflexão máxima à passagem de um rodado de camião. O equipamento pode também ser usado para medição de deflexões em ensaios estáticos de carga com placa [Fontul, 2004].

O equipamento tem uma extremidade, onde assenta no pavimento sobre dois apoios, que tem instalado o deflectómetro e o eixo sobre o qual apoia a viga. A outra extremidade é uma ponta apalpadora da superfície do pavimento, que é assente na superfície, no ponto da medição de deflexão.



Figura 2.3 Viga de Benkelman [SOLOCAP, 2012]



A medição de deflexão é medida por um transdutor de deslocamentos (tipo LVDT) colocado sobre a viga Benkelman, e a distância relativa de percurso do veículo é medida por um transdutor de distâncias ligado ao rodado do camião. O comportamento do pavimento é medido na descarga.

O Defletógrafo LNEC, ilustrado na Figura 2.4, é um equipamento que foi desenvolvido no LNEC nos anos 60 [Antunes,1993] utilizando a Viga Benkelman. Para este ensaio é utilizado um camião com uma carga de 80 ou 130 kN no seu eixo traseiro, de constituição simples e rodado duplo. A viga Benkelman é colocada entre os rodados de modo que a ponta apalpadora se apoie sobre o ponto de ensaio. O camião, parado a uma distância de um metro, passa pelo ponto do ensaio à velocidade de 2 a 3 km/h.



**Figura 2.4 Ensaio com o Defletógrafo LNEC utilizando a Viga de Benkelman [FRESAGEM, 2012]**

Existem atualmente versões digitais de Viga Benkelman em alumínio e formato telescópico [Govind, 2010; ENKAY, 2009], de medição e registo automático de deflexões através de uso de transdutor eletrónico, PDA e GPS e programa informático [Govind, 2010; SHAMROCK, 2009].

Para melhorar a eficiência da medição de deflexão da Viga Benkelman, foi desenvolvido em França pelo LCPC, nos anos 50, o Defletógrafo Lacroix [Fontul, 2004; Antunes, 1993]. Semelhante à Viga Benkelman, este equipamento consiste numa viga em forma de “T” montada sob um camião de seis rodados de eixo traseiro duplo com carga entre 50 a 130 kN [Govind, 2010; CRBL, 2004; GEOCISA, 2009]. O ensaio é feito com o veículo em andamento, à velocidade de 5Km/h, nas duas rodeiras em pontos sucessivos de 3 a 5 metros [Antunes, 1993].

Tem como vantagem permitir a medição quase contínua e sobre as duas rodeiras interna e externa. Tem como desvantagem não permitir a medição da deformada completa, além de que as deflexões são medidas na carga e não na descarga, o que permite obter o valor

da soma de deformação elástica com a deformação permanente mas não o valor de deformação reversível [Antunes,1993]. E a condicionante da velocidade de operação, que sendo a 5 Km/h é bastante baixa comparativamente à velocidade normal de tráfego, existindo ainda, devido às características do camião, limitação de acesso a zonas com restrições de carga ou dimensões exíguas [Fontul, 2004].

O Curvímetro apareceu em seguida, para permitir um rendimento superior ao Defletómetro Lacroix, sendo representado na Figura 2.5. O Curvímetro é composto por um camião que, sob a solicitação dos rodados de eixo traseiro, mede as deflexões na superfície do pavimento a uma velocidade de 18 km/h. As deflexões são medidas de 5 em 5 metros de distância por 3 geofones equidistantes entre si, fixos numa corrente com 15 m de comprimento que opera no espaço entre o rodado duplo da rodéira direita, e entra em contacto com a superfície do pavimento a 1 m à frente do rodado e eleva-se, deixando o contacto com a superfície, 3 m após passar o eixo do rodado duplo [Alves, 2007].



Figura 2.5 Curvímetro [Govind, 2010; adaptado de Alves, 2007]

Este equipamento, embora obtenha a deformada completa das deflexões a uma velocidade superior que o Defletógrafo Lacroix, tem como característica a capacidade de medição da temperatura do ar e da superfície do pavimento *in situ*, o que permite um ensaio mais personalizado para o tipo de pavimento. Refira-se o caso dos pavimentos com ligantes betuminosos em que a temperatura influencia o comportamento do pavimento de forma mais evidente [Alves, 2007].

Assim como o Defletógrafo Lacroix, o equipamento não pode aceder a zonas com restrições de carga e dimensões exíguas [Fontul, 2004].

Aparece então, em França no LCPC nos princípios de anos 60, o primeiro Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer – FWD*), que foi sendo melhorado e aperfeiçoado

na década de 70 na Holanda [Shell, 1978] e na Dinamarca. PHONIX e DYNATEST, para modelos comerciais [Fontul, 2004; Antunes, 1993].

O Deflectómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer – FWD*) é atualmente o equipamento de medição de deflexões mais usado na Europa, América do Norte e Japão [Fontul, 2004].

Este ensaio consiste na aplicação de uma força de impulso à superfície do pavimento, gerada pela queda de uma massa de uma determinada altura sobre um conjunto de amortecedores e transmitida à superfície através de uma placa metálica circular.

A medição das deflexões no pavimento é feita por um conjunto de transdutores de deflexões apoiados linearmente sobre a superfície do pavimento. A deformada obtida reflete a influência das diferentes camadas na resposta do pavimento à solicitação aplicada [Fontul, 2004; Antunes, 1993].

Este equipamento tem a vantagem de permitir simular diferentes condições de carregamento, através da possibilidade de variação dos parâmetros de ensaio, tais como a altura de queda, a massa, o número de amortecedores e a dimensão da placa de carga. Tem ainda a vantagem de permitir obter uma deformada completa em cada ponto de ensaio.

As desvantagens do equipamento são de não permitir a realização de ensaios à velocidade normal de tráfego e de não permitir a realização de ensaios de modo contínuo ao longo da extensão do pavimento. No entanto, hoje em dia, o *FWD* é utilizado para uma análise mais detalhada de zonas específicas de estudo. No futuro poderá complementar outros ensaios, com equipamentos desenvolvidos ainda ao nível de protótipos, nomeadamente em complemento das campanhas de ensaios ao nível de rede efetuadas pelos equipamentos deflectómetros de Alta Velocidade, como por exemplo o *Rolling Wheel Deflectometer* que serão referidos mais à frente [Govind, 2010; FHWA, 2008].

Existe ainda uma versão leve do Defletómetro de Impacto, o Defletómetro de Impacto Portátil (DIP), que tem como objetivo a realização de ensaios para controlo de qualidade de materiais granulares e solos de fundação. Sendo um equipamento portátil, torna-se fácil o seu transporte para qualquer local de difícil acesso a veículos. Tem um limite de carga máxima aplicável de 20 kN e medição de deflexões em 3 pontos no máximo [Fontul, 2004].

Mais tarde, nas últimas décadas, aparecem umas evoluções do FWD que permitem a realização dos ensaios à velocidade normal de tráfego que são considerados Deflectómetros de Alta Velocidade (*High Speed Deflectometers*). A vantagem destes aparelhos, quando comparados com os restantes, é de simularem melhor a velocidade e a carga do tráfego, isto é, para além de não interferirem com a circulação dos veículos, tornam o ensaio mais rápido e mais seguro, menos custo de operações [Fontul, 2004; Arora et al., 2006].

Tem-se o caso do *Rolling Wheel Deflectometer* (RWD), demonstrado na Figura 2.6, desenvolvido nos E.U.A., e o *Road Deflection Tester* (RDT) [Andrén, 2006], desenvolvidos na Suécia, que são equipamentos com sensores a laser. Normalmente são atrelados ou integram um veículo pesado e fazem as medições à distância. A deflexão é calculada como a diferença medida entre um perfil do pavimento carregado e um outro perfil não solicitado [Alves, 2007; Fontul, 2004].



Figura 2.6 Rolling Wheel Deflectometer [Govind, 2010; adaptado de Andrén, 2006]

Outro tipo de equipamento considerado de alta velocidade é o, apresentado Figura 2.7, *Traffic Speed Defletometer* (TSD), de nome original *High Speed Deflectograph* (HSD) até 2006 [Govind, 2010; Greenwood, 2009; Fontul, 2004], desenvolvido na Dinamarca para velocidades até 80 km/h e cargas de solicitação de 100 kN, que utiliza tecnologia de ultra-sons (doopler) para a medição de deflexões [Govind, 2010; TRL, 2009]. Com a evolução da tecnologia, podem-se associar, então, os equipamentos em dois grupos dependendo do tipo de solicitações aplicadas ao pavimento [Antunes, 1993].

O primeiro grupo é caracterizado pela utilização de cargas padrão de tráfego constituída por rodados de veículo pesado, designado de carga rolante, simulando a situação real em termos de solicitação induzida no pavimento. Durante o ensaio, a passagem da carga rolante pelo ponto de ensaio é feita a uma determinada velocidade, que varia nos diferentes métodos de ensaio, sendo a situação de melhor caracterização aquela que melhor simula a velocidade normal de tráfego. São exemplos destes equipamentos o Defletógrafo LNEC, o Curvímetro, o *Rolling Wheel Deflectometer*, o *Road Deflection Tester* e o *Traffic Speed Deflectometer*.



Figura 2.7 Traffic Speed Defletometer e sistema de montagem [Jenkins, 2004]

Num segundo grupo tem-se os equipamentos que utilizam carga estacionária (não móvel) num ponto fixo e tendem a simular, em um ou vários aspetos, a passagem de um eixo padrão de um veículo pesado. Nestes equipamentos o tipo de solicitação transmitida à superfície pode ser estática ou dinâmica. Neste último caso a solicitação pode ser sinusoidal ou sob a forma de impulso. São exemplos destes equipamentos o Ensaio de Carga com Placa (solicitação estática), os equipamentos *Dynaflect*, *Road Rater*, representado na Figura 2.8, e *WES Vibrator* (solicitação sinusoidal), e os equipamentos Deflectómetro de Impacto e Deflectómetro de Impacto Portátil (solicitação sob a forma de impulso) [Antunes, 1993].



Figura 2.8 Dynaflect [adaptado de Govind, 2010]

### 2.3.2 Defletómetro de Impacto (FWD)

Dado que o FWD foi um dos equipamentos utilizados no desenvolvimento do caso de estudo apresentado no Capítulo 4, considerou-se importante efetuar uma descrição mais pormenorizada das suas principais características.

O Deflectómetro de Impacto, como já foi mencionado em cima, é um equipamento que tem um sistema de cargas e dispositivos para a medição de deflexões, habitualmente montado

num atrelado de um veículo. No interior do veículo rebocador são instalados, entre outros, os componentes eletrónicos e um computador através do qual são efetuados o controlo do ensaio e o registo dos resultados. Uma das características deste aparelho é a sua capacidade de medição das temperaturas através de sensores instalados.

Na Figura 2.9 apresenta-se o deflectómetro de impacto do LNEC e que foi usado no desenvolvimento do estudo apresentado no presente trabalho.



**Figura 2.9 Deflectómetro de Impacto (FWD) do LNEC**

O sistema de funcionamento deste equipamento compreende uma massa que é deixada cair livremente sobre um sistema de molas constituído por amortecedores de borracha, o qual transmite através de uma placa circular, uma força de impulso à superfície em ensaio. A resposta do pavimento é obtida através de medição de um conjunto de deflexões em determinados pontos previamente definidos sobre a superfície do pavimento [Fontul, 2004].

Para uma certa temperatura, a duração do impulso da carga é independente da altura da queda da massa, isto é, se a duração do impulso tem de ser alterado, então a massa ou o diâmetro da placa circular terão de ser também alterados. Quanto mais peso, mais longa será a duração do impulso. E quanto maior for a área da placa, mais curto será o impulso.

Mudando a carga e o tipo de amortecimento, é possível chegar à carga de pico mantendo a duração do impulso a 25-30 ms [Carl Bro, 2007].

Para haver uma simulação mais próxima da de um veículo que circula a velocidades de 60 a 80 Km/h, a força de impulso vai tendo variações ao longo do tempo [Antunes, 1993]. A forma e o valor de pico da força do impulso variam, dependendo do peso, da altura de queda e das propriedades do sistema de amortecimento que forem definidos para o ensaio [Fontul, 2004; Domingos, 2007].



O pico da força pode atingir normalmente valores entre 20 e 150 kN, existindo também outras versões deste equipamento, designadas de Heavy FWD (HFWD), que podem gerar forças de impulso de 250 kN, ou ainda Super Heavy Weight Deflectometer (Super HWD), que podem gerar forças de impulso de 300 kN. Estas duas últimas versões, tendo em conta as cargas de eixo padrão, servem para o estudo de pavimentos aeroportuários [Govind, 2010; Carl Bro, 2007].

A duração do impulso pode variar entre 25 ms e cerca de 200 ms, sendo a resposta do pavimento medida por um conjunto de transdutores, geralmente 6 a 9, existindo já a possibilidade de colocar 17 ou mais sensores, espaçados em alinhamento longitudinal reto, com determinados afastamentos predefinidos a partir do centro da placa de carga [Fontul, 2004].

Existem dois tipos diferentes de transdutores de deflexões utilizados atualmente nos Deflectómetros de Impacto [Fontul, 2004]: o geofone, transdutor de velocidade sísmica, que mede as velocidades da superfície do pavimento e converte-as em deflexões por integração de sinal, e o sismómetro, transdutor de deslocamentos sísmicos, que mede diretamente as deflexões da superfície do pavimento, Figura 2.10 [Govind, 2010; Alves, 2007].



**Figura 2.10 Geofones do Deflectómetro de Impacto**

O ensaio é feito com o veículo parado, e o sistema de carga e o sistema de dispositivos de medição de deflexões são apoiados na superfície do pavimento. São efetuados pelo menos dois impactos para cada ponto de ensaio, sendo o primeiro impacto para o ajustamento da placa de carga à superfície do pavimento. Para a deslocação para o ponto seguinte de ensaio, os dispositivos são automaticamente recolhidos para uma posição de transporte [Govind, 2010; Antunes, 1993].

Durante o ensaio, aquando do posicionamento dos transdutores, se algum dos sensores ficar incorretamente colocado sobre a superfície a ensaiar, sobretudo em superfícies irregulares, o programa de aquisição de dados identifica a anomalia notificando o operador da necessidade de repetição do ensaio [Govind, 2010; *NCHRP 626*, 2009].

O ensaio tem a duração aproximada de 2 minutos, incluindo o impacto para o ajustamento da placa de carga. A configuração do equipamento de ensaio e do sistema de aquisição de dados deve ser efetuada no início da campanha e uma vez por dia. A duração para esta tarefa é de cerca de 30 minutos para a configuração do equipamento e de 2 a 3 minutos para a configuração do programa de aquisição de dados [Govind, 2010; *NCHRP 626*, 2009].

### **2.3.3 Defletómetro de Impacto Portátil (DIP)**

Uma vez que este equipamento, também foi escolhido para o desenvolvimento desta dissertação, será realizada uma explicação mais aprofundada do modo de funcionamento deste equipamento.

O Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP), apresentado na Figura 2.11, de diversas designações em Inglês: Light Falling Weight Deflectometer (LFWD), Light Falling Deflectometer (LFD), Portable Falling Weight Deflectometer (PFWD) ou Light Drop Weight (LDW), é uma versão mais leve do Deflectómetro de Impacto convencional (FWD), como já foi dito mais acima, que utiliza os mesmos princípios deste equipamento. Existem diversos fabricantes de Deflectómetro de Impacto Portátil, sendo exemplos: Prima 100 da Grontmij-Carl Bro e 3031 LWD da Dynatest (ambas Dinamarquesas), ZFG 2000 da Zorn Stendal (Alemanha) e Loadman PFWD (Finlândia).





**Figura 2.11 Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP)**

O DIP é normalmente utilizado para determinação do módulo de deformabilidade das camadas granulares e solos de fundação compactados, sendo útil para o controlo de qualidade na fase de construção [Govind, 2010; Grontmij-Carl Bro, 2009; Dynatest, 2009].

O equipamento é constituído por uma placa de carga circular que contém um furo no centro. Sobre a placa está instalado um cilindro oco, que permite a transferência para a placa, do impulso resultante da queda de uma massa de uma determinada altura. A massa é conduzida por um varão-guia fixo ao sistema de carga, e é elevada manualmente até a altura de queda pretendida e fixa nessa posição por um dispositivo localizado na parte superior do varão-guia [Fortunato, 2005].

A força de queda da massa é absorvida por amortecedores, representados na Figura 2.12, que transmitem depois o impulso ao sistema de carga. Entre os amortecedores e o cilindro oco encontra-se instalada uma célula que tem a função de medir a força aplicada à superfície a ensaiar.



Figura 2.12 Massa, amortecedores e placa de carga do DIP

As deflexões são medidas por um conjunto de 3 geofones, estando um deles localizado no interior do cilindro, o qual atua através do furo central da placa de carga. A duração do impulso da carga é de cerca de 15 a 30ms [Govind, 2010; Gudishala, 2004; NCHRP 382, 2008].

A célula de carga e os geofones estão ligados a um dispositivo eletrónico (PDA , *Smart phone* ou computador portátil) que faz o registo automático da força aplicada, das deflexões e do historial da deflexão central e respetivo valor de pico. Para georreferenciação é possível o uso de GPS. O processamento de dados é feito através de ambiente Window [Grontmij-Carl Bro, 2009; Dynatest, 2009, Fortunato, 2005].

À semelhança do FWD, o DIP permite variar as condições de ensaio através de quatro diâmetros disponíveis de placa de carga, que podem ser de 100, 150, 200 ou de 300 mm [Dynatest, 2009], e alturas de queda variáveis com um valor máximo de 0,80 m. A massa padrão de carga de ensaio é de 10 kg, havendo no entanto disponíveis massas de 15 e de 20 kg. A localização dos transdutores de deflexões pode ser definida para uma distância máxima de 0,60 metros ao centro de carga [Fortunato, 2005].

Em estudos efetuados no âmbito de NCHRP [NCHRP 626, 2009] o tempo de cada ensaio foi de cerca de 10 segundos. No entanto, o tempo total médio para a operação de ensaio num determinado ponto foi de cerca de 5,5 minutos, tendo o procedimento de ensaio, como no caso do FWD consistindo na aplicação de uma primeira queda para ajustamento de placa de carga, que não é registada. Geralmente, são realizados 5 a 10 ensaios (quedas) em cada ponto, sendo utilizados para análise um dos últimos, dado que assim garantem mais estabilidade do equipamento.

A ASTM aprovou em 2007 as normas de procedimento de ensaio *in situ* com o DIP, ASTM E2583-07 [ASTM, 2009], com o objetivo de normalizar o procedimento de ensaio com

células de carga para medição de deflexão e módulos de bases e solos compactados [NCHRP 382, 2008]. Uma norma internacional para o uso do Deflectómetro de Impacto Portátil encontra-se atualmente a ser desenvolvida [Dynatest, 2009].

Vários estudos de pesquisa envolvendo o DIP de diversos fabricos [NCHRP 382, 2008] demonstraram existir uma boa correlação dos módulos obtidos com o DIP e com o FWD, ainda que nem sempre combinassem com os módulos de FWD. Verifica-se que os módulos têm tendências semelhantes em função do tipo de solo e do seu estado de compactação, pelo que se confirma a possibilidade de utilização do DIP para estimar módulos resilientes dos solos de fundação compactados e bases granulares. É necessário no entanto mais investigação sobre este método para melhor conhecer o seu potencial para interpretar os módulos medidos no campo, o que poderá conduzir a uma futura implementação deste método para o dimensionamento de pavimento [Suzuki et al., 2004].

As limitações do DIP relacionam-se com o facto de não permitir a transmissão de cargas similares às dos veículos pesados, e as medições de carácter descontínuo. Necessita também de melhorar o programa de cálculo para permitir obter valores de rigidez de várias camadas. O DIP como é portátil, tem a vantagem de se poder utilizar em locais mais exíguos onde o FWD não pode ser utilizado [Govind, 2010; SHRP 2, 2009], sendo fácil de transportar manualmente para qualquer local de difícil acesso a veículos.

#### **2.3.4 Deflectómetros para medição a Alta Velocidade**

Para realizar medições de deflexões de um modo mais prático, nas últimas décadas, têm vindo a ser desenvolvidos novos equipamentos que o permitem um a medição à velocidade normal de tráfego.

Estes tipos de equipamentos, comparando com os mais antigos, têm a vantagem de ter uma representação mais realista da velocidade e da carga de tráfego, em simultâneo, o que torna boas condições de segurança, durante a medição, uma vez que não há interferências na circulação automobilista. Consequentemente, os ensaios tornam-se mais rápido e por associação de fatos, menores custos de operações [Fontul, 2004; Arora et al., 2006].

Foram desenvolvidos dois tipos de equipamentos, consoante as medições, os equipamentos recorrendo a sensores a laser e outros a ultra-sons.

Como exemplos de equipamentos com sensores a laser, tem-se o caso do *Rolling Wheel Deflectometer (RWD)* desenvolvido nos E.U.A., e o equipamento *Road Deflection Tester (RDT)*, desenvolvido na Suécia. Funcionam, normalmente, atrelados ou integrados num veículo

pesado e recorrem a sistemas de medição à distância com sensores laser, das deflexões da superfície do pavimento, induzidos pelos rodados de um camião em circulação à velocidade normal de tráfego [Alves, 2007; Fontul, 2004]. A medição da deflexão é feita com base na diferença medida entre um perfil do pavimento carregado e um outro perfil não solicitado.

Os equipamentos que utilizam a tecnologia ultra-sons (doopler), o segundo caso, tem-se como exemplo o *Traffic Speed Defletometer (TSD)*, de nome original *High Speed Deflectograph (HSD)* até 2006 [Greenwood, 2009; Fontul, 2004], desenvolvido na Dinamarca para velocidades até 80 km/h e cargas de solicitação de 100 kN [TRL, 2009].

A TRL tem vindo a desenvolver pesquisa com o objectivo de definir uma especificação com base na qual se possa vir a efectuar medições rotineiras a nível de rede [TRL, 2009].

## 2.4 Medição da espessura das camadas - Radar de Prospeção (GPR)

Um dos equipamentos mais utilizados e mais úteis para este tipo de ensaios é o Radar de Prospeção, representado na Figura 2.13. É através deste tipo que aparelho que é possível conhecer as espessuras das diferentes camadas existentes no pavimento. Por vezes é inexistente qualquer tipo de informação ou registo da infraestrutura existente, quer por motivos de restaurações antigas, ou até mesmo na fase inicial da via [Fontul, 2004].



Figura 2.13 Radar de Prospeção (RADAR) [LNEC, 2011]

O RADAR [*Radio Detecting and Ranging*] é um método que utiliza ondas eletromagnéticas para localizar objetos no subsolo. Ao transmitir-se um impulso de energia a partir da superfície, esta propaga-se verticalmente no subsolo, e ao intersectar um determinado objeto ela é refletida para a superfície. O tempo de percurso da energia refletida permite determinar a profundidade à qual o objeto se encontra localizado no subsolo.

O RADAR foi desenvolvido nos finais dos anos 20, por Militares, com o objetivo de deteção de minas não metálicas localizadas no subsolo. Contudo, a aplicação com sucesso na ciência verificou-se nos finais dos anos 50 e nos anos 70 iniciou-se o uso para estudos geotécnicos [Fontul, 2004].

Mais recentemente foi desenvolvido o *GPR* (*Ground Penetrating Radar*) que é um equipamento que permite auscultar em profundidade um pavimento e obter informação sobre as espessuras constituintes das suas camadas, bem como localizar as alterações da estrutura ao longo da extensão do pavimento em estudo. Devido à capacidade de efetuar medições em contínuo e a uma velocidade elevada sem interferir com o tráfego, o seu contributo é de grande importância para estudo da avaliação da capacidade estrutural de um pavimento, em particular, quando se utilizam métodos em que se consideram as camadas da estrutura do pavimento, como é o caso de *FWD* ou de *DIP*.

O modo de funcionamento do GPR baseia-se na geração, emissão e receção de energia electromagnética, como mostra a Figura 2.14. Para isso dispõe normalmente de duas antenas, uma emissora e outra recetora. A antena emissora envia para a estrutura a energia, em forma de impulso de curta duração, gerada pelo equipamento. Esta energia propaga-se em profundidade e ao atravessar um horizonte que delimita duas camadas de materiais de propriedades eletromagnéticas suficientemente diferentes, parte da energia é refletida e a restante prossegue a propagação por refração. A energia refletida é captada pela antena recetora [Fontul, 2004].

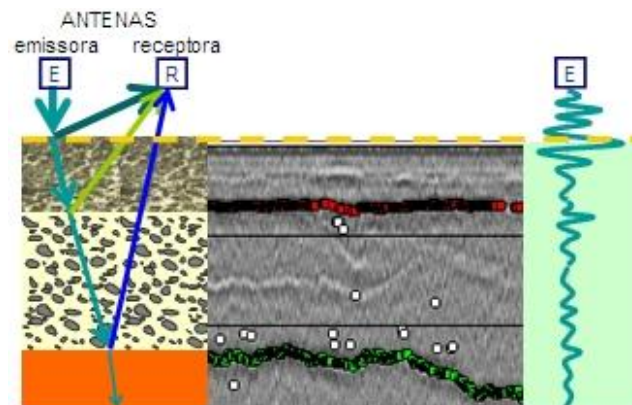


Figura 2.14 Funcionamento do RADAR [LNEC, 2011]

O tempo de percurso da energia refletida determina a localização, a partir da superfície, da interface entre as duas camadas adjacentes e a amplitude da onda recebida fornece a informação sobre o tipo de descontinuidade dielétrica [Fontul e Antunes, 2000; Fortunato, 2005].

A propagação de energia eletromagnética é função essencialmente da constante dielétrica e da condutividade elétrica dos materiais. Da constante dielétrica depende a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, a reflexão e a refração do sinal, nos meios de baixa condutividade e sem suscetibilidade magnética. A condutividade elétrica controla a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas e também a reflexão do sinal no caso dos meios de elevada condutividade. [Fortunato, 2005].

Resultados de estudos em meios compostos de solo, água e ar, demonstraram que o aumento da constante dielétricas num meio traduz a diminuição das características mecânicas dos materiais e o aumento do teor em água resulta num aumento da condutividade e da constante dielétrica [Fortunato, 2005].

Cada um destes equipamentos tem o seu próprio programa informático de processamento de dados. Existem também programas desenvolvidos por utilizadores de GPR, como por exemplo pela SCANNERS na Finlândia.

O tipo de antenas e as frequências utilizadas no GPR determinam a sua capacidade no respeitante à velocidade de operação, a resolução e o grau de penetração em profundidade no solo [Fontul, 2004].

Existem dois tipos de antenas de GPR: antena Dipolar e antena Suspensa. As gamas de frequência variam entre 16 MHz e alguns GHz. O funcionamento das antenas pode ser de apoio na superfície ou de suspensão no ar. As suas dimensões variam bastante. Quanto maior for a frequência mais pequena é a antena e maior é a sua resolução, mas menor a profundidade de auscultação [Fontul, 2004; Fortunato, 2005].

As antenas Dipolares podem ter frequências na gama entre 16 e 1500 MHz. Foram inicialmente desenvolvidas para uso na área de geologia e são normalmente de apoio na superfície. Nestas condições, o sinal transmitido ao solo é mais forte e sensível, aumentando a profundidade de leitura, mas para estudos de pavimentos permitem ensaios à velocidade máxima de 8 km/h.

As antenas dipolares podem ser também de suspensão, permitindo neste caso uma maior velocidade de ensaio. Para melhores resultados as antenas dipolares de suspensão devem localizar-se a uma distância reduzida da superfície.

Para estudos de pavimentos utilizam-se antenas com frequências superiores a 400 MHz. As antenas dipolares de 400 MHz permitem uma penetração de 2,0 m de profundidade e uma resolução de 600 mm. As antenas dipolares de 1500 MHz permitem atingir profundidades de 0,50 m, mas com uma resolução bastante superior, de 20 mm. Podem-se ainda utilizar antenas múltiplas com diferentes frequências, de modo a otimizar a quantidade de informação a recolher [Fontul, 2004].

As antenas de suspensão, com frequência entre 500 e 2500 MHz permitem penetrações na ordem entre os 0,60 e 0,90 m e uma resolução na ordem dos 50 e 25 mm, respetivamente. Funcionam geralmente suspensas a 0,40 m acima da superfície do pavimento e operam à velocidade de tráfego, até 100 km/h [Fontul e Antunes, 2000]. São por isso adequadas para avaliação de pavimentos a nível de rede. Existem várias soluções de montagem de apoio das antenas suspensas, quer com recurso a atrelado, quer diretamente sobre o veículo de transporte.

O equipamento *GPR* do LNEC dispõe de dois pares de antenas de suspensão, sendo um par com frequência de 1000 MHz e outro par com frequência de 1800 MHz (2 GHz) [Fontul, 2004].

O aparelho principal é constituído por módulos de transdutor de interface, de *hardware* de recolha de dados e processamento de sinal, dispositivos de armazenamento de dados e conexões para dispositivos externos. A unidade de controlo e entrada de dados é um computador portátil o qual está ligado ao aparelho principal [Govind, 2010; Geophysical Survey System, 2009].

Em estudos comparativos utilizando vários equipamentos de ensaios não destrutivos, realizados no âmbito de *NCHRP* [Govind, 2010; *NCHRP* 626, 2009], verificou-se que as previsões de espessuras de camadas de bases granulares fornecidas por *GPR* eram razoavelmente precisas e nenhum dos outros equipamentos tinha a capacidade ou a mesma precisão para determinar as espessuras de camadas não ligadas.

*GPR* é, hoje em dia, utilizado como rotina, embora a interpretação de resultados obtidos seja ainda complexa e requer experiência [Fontul, 2004]. A utilização de *GPR* não dispensa ainda a realização de sondagens para calibração de espessuras de camadas e identificação das interfaces das camadas dos pavimentos. Nesta área novas técnicas de medição de espessura de camadas são investigadas, nomeadamente a utilização de baroscópio para obtenção de imagens a partir de micro furos (20 mm) feitos no pavimento [Govind, 2010; Gopaldas *et al.*, 2009].

## **2.5 Critérios de Ruína**

Para caracterizar estruturalmente um pavimento é necessário estudar o seu comportamento tendo em consideração dois critérios de ruína, o comportamento à fadiga e à deformação permanente. Estes critérios são expressos através de um valor em função de um

determinado uso, isto é, em função do tráfego associado a um dado período de vida útil considerado [COST 333, 1999].

### 2.5.1 Critério de fadiga

O critério de ruína por fadiga está associado ao fendilhamento das camadas betuminosas, ou seja, à extensão de tração medida na base da camada betuminosa. A deformação permanente está relacionada com as ações de corte, isto é, calcula-se a extensão de compressão no topo da camada de fundação [Dias, 2009].

Em termos de fadiga (“load-related cracking” na terminologia usada pela AASHTO), é assumida a existência de dois tipos de causa. Uma primeira que a maior parte das vezes dá origem a um fendilhamento chamado pele de crocodilo (“bottom-up fatigue cracking” na terminologia usada pela AASHTO), que se inicia na zona inferior das camadas betuminosas e que, com a passagem do tráfego pesado, se propaga até à superfície. Uma segunda, que dá origem principalmente a fendilhamento longitudinal, (“top-down cracking” na terminologia usada pela AASHTO), que se forma a partir da superfície e transmite-se à zona inferior das camadas betuminosas.

É então, associado à fadiga, que calcular-se-á o número admissível, equação (2.7), abaixo, de repetição de carga por eixo definido para cada tipo de fendilhamento, ou seja, funcionará de maneira semelhante à lei de fadiga da Shell, apesar dos pontos críticos ao longo da estrutura não serem exatamente os mesmos [Dias, 2009].

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (2.7)$$

Sendo:  $N_{f-HMA}$  - Número admissível de aplicações de carga por eixo definido para um pavimento flexível;

$\varepsilon_t$  - Extensão de tração nos locais críticos, ou seja, na zona inferior do pavimentos betuminoso, “bottom-up fatigue cracking”, ou imediatamente abaixo da superfície, “top-down fatigue cracking”, respetivamente;

$E_{HMA}$  - Módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, “HMA”, medido em compressão, em psi;

$k_{f1}$ ,  $k_{f2}$ ,  $k_{f3}$  - parâmetros indicadores que advêm de observações no campo;

( $k_{f1}=0,007566$ ,  $k_{f2}=-3,9492$  e  $k_{f3}=-1,281$ );



$B_{f1}$ ,  $\beta_{f2}$ ,  $\beta_{f3}$  - constantes de calibração locais ou da mistura medida no campo;  
estas constantes são iguais a 1,0 no caso de calibração global;

$C_H$  - Termo de correção da espessura, depende do tipo de fendilhamento.

A partir da Figura 2.15, pode observar-se os locais críticos de fadiga, isto é, os locais onde será necessário retirar os valores das extensões de tração para a sua avaliação.

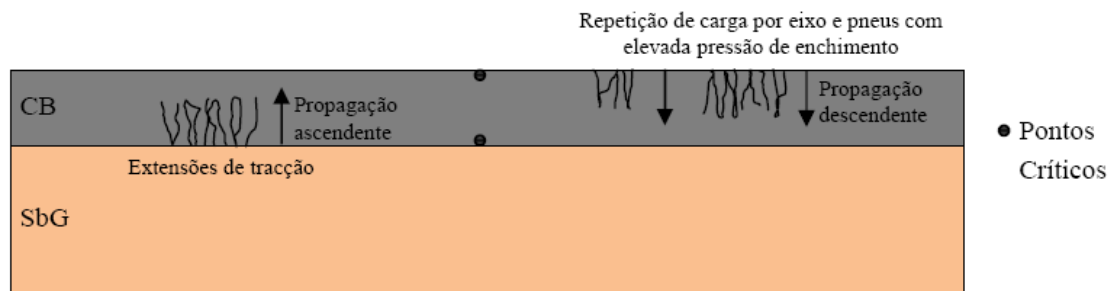


Figura 2.15 Pontos críticos e sinalização dos dois tipos de fadiga considerados pela AASHTO [Dias,2009]

A equação (2.8), abaixo, permite o cálculo da incógnita,  $C$ , acima.

$$C = 10^M \quad (2.8)$$

$$M = 4,84 \times \left( \frac{V_{beff}}{V_v + V_{beff}} - 0,69 \right) \quad (2.9)$$

Sendo:  $M$ - Potência da expressão acima, dada pelo de baixo;

$V_{beff}$  - Percentagem volumétrica efectiva de betume;

$V_v$  – Volume de vazios (expresso em %).

Para o fendilhamento chamado pele de crocodilo, inicia-se na face inferior das camadas betuminosas, “bottom-up” , aplica-se a equação (2.10), abaixo.

$$C_H = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \times H_{HMA})}}} \quad (2.10)$$

Para o caso “top-down”, que ocorre quando o fendilhamento inicia-se na face superior do pavimento e desenvolve em direcção à face inferior, aplica-se a próxima equação (2.11).

$$C_H = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 \times H_{HMA})}}} \quad (2.11)$$

Sendo:  $H_{HMA}$  – a espessura total das camadas betuminosas, expresso em polegadas.

Em resumo, os critérios mais usados para o critério de ruína fadiga estão apresentados no Quadro 2.11, abaixo.

**Quadro 2.11 Principais critérios usados no fendilhamento por fadiga [Fontul, 2004]**

Entidade	Critério
Shell	$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N_t^{-0,2}$
Nottingham	$\varepsilon_t = \varepsilon_6 N_t^{(5,13 \times \log(V_b) + 8,36 \times \log(AB) \times 15,8)^{-1}}$
Asphalt Institute	$\varepsilon_t = 0,0016 \times N_t^{-0,21}$
LCPC	$\varepsilon_t(T, Fr) = k_r k_c k_s \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \times \left(\frac{E(10^\circ C)}{E(T)}\right)^{0,5} \times \left(\frac{N_t}{10^6}\right)^b$
CRR	$\varepsilon_t = G(B') \times \frac{V_b}{V_b + V_v} \times 2,718^{(-5 \times \frac{V_a}{100})} \times \frac{N_t^{-a}}{10^6}$

Sendo:

$\varepsilon_t$  – Extensão máxima horizontal de tração na base das camadas betuminosas;

$N_t$  – número admissível de passagens de eixo padrão (fadiga);

$V_b$  – percentagem volumétrica de betume;

$AB$  – ponto de amolecimento anel e bola;

$E$  – módulo de deformabilidade;

$T$  – temperatura de referência;

$\varepsilon_6$  - Extensão correspondente à vida de fadiga de 106 ciclos;

$k_r k_c k_s$  - factores de correcção, os quais multiplicados por  $\varepsilon_6$ , são usados para ajustar valores experimentais à condição real;

$V_a$  – percentagem volumétrica de agregados;

$V_v$  – volume de vazios;

$B'$  – susceptibilidade de penetração do betume ao tempo de carga;

$G$  – coeficiente dependente de  $B'$ ;

$$a = 0,194 \times B' + 0,3 \times \frac{V_a}{100} - 0,109$$

### 2.5.2 Critério de deformação permanente

A deformação permanente, de acordo com a AASHTO, tem a ver com a profundidade da infraestrutura, isto é, a deformação permanente é causada pela deformação vertical plástica das camadas betuminosas, granulares e do solo de fundação.

Normalmente é utilizada uma abordagem de cálculo que considera só a deformação permanente da camada do solo de fundação, sendo estimada através da extensão vertical de compressão no topo dessa camada.

Geralmente, as equações para o critério de ruína por deformação permanente expressam a extensão vertical de compressão no topo da fundação em função do número de aplicações de carga. Alguns dos critérios mais utilizados encontram-se no Quadro 2.12.

**Quadro 2.12 Principais critérios para leis de deformação permanente [Fontul, 2004]**

Entidade	Lei de deformação permanente
SHELL	$\epsilon_c = k_1 N_c^{-0,25}$
NOTTINGHAM	$\epsilon_c = 0,0216 N_c^{-0,28}$
Asphalt Institute	$\epsilon_c = 0,0105 N_c^{-0,223}$
LCPC (Pavimentos novos)	$\epsilon_c = 0,021 N_c^{-0,24}$
LCPC (Reforço de pavimentos)	$\epsilon_c = 0,028 N_c^{-1/4,1}$
CRR	$\epsilon_c = 0,011 N_c^{-0,23}$

Sendo:  $\epsilon_c$  é a extensão máxima vertical de compressão no topo da fundação;

$N_c$  é o número admissível de passagens de eixo padrão;

$K_1 = 1,8 \times 10^{-2}$  para 5% de probabilidade de ruína ou

$K_1 = 2,1 \times 10^{-2}$  para 15% de probabilidade de ruína ou

$K_1 = 2,8 \times 10^{-2}$  para 50% de probabilidade de ruína.

### 2.5.3 Novas abordagens

Existem novas abordagens, mais realistas, baseadas no cálculo incremental do cavado de rodeira dentro de cada subcamada, como apresentado no trabalho desenvolvido por Dias (2009).

O cavado de rodeira é estimado para o centro de cada uma das subcamada existentes na estrutura do pavimento. Assim, a deformação permanente total (cavado de rodeira total)

para um dado período de tempo, corresponde ao somatório das deformações de cada uma das sub-camadas nesse período de tempo.

O modelo para o cálculo das deformações permanentes totais usa as extensões verticais calculadas para condições específicas do pavimento e para o número total de pesados, representado na Figura 2.16. Estas variam de um mês para o outro pelo que é considerado necessário [AASHTO, 2008] usar uma aproximação especial a que chama “strain hardening” (terminologia usada pela AASHTO para a deformação por endurecimento), incorporando estas extensões verticais em cada mês num sistema cumulativo de deformação.

Este estudo, para as camadas betuminosas dos pavimentos rodoviários flexíveis usa-se aborda-se o caso considerando dois meses, cada um deles representativo do período de verão e de inverno. Ou seja, a deformação de cada um destes períodos será acumulada, resultando assim a deformação total [Dias, 2009].

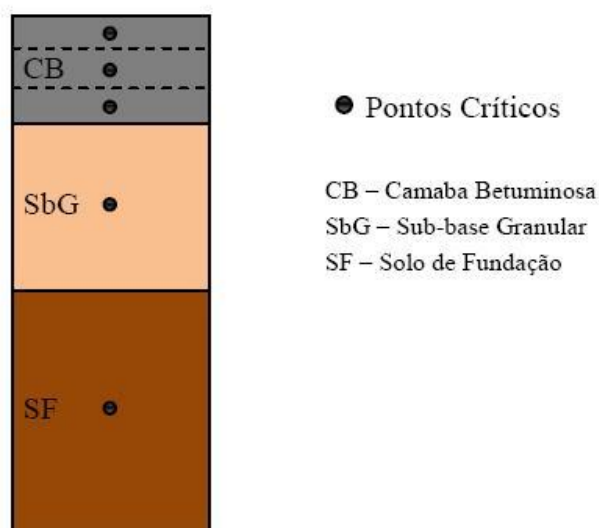


Figura 2.16 Indicação dos pontos críticos para a deformação permanente [Dias, 2009]

## 2.6 Modelação do comportamento do pavimento

Em 1885, Boussinesq, através das equações de equilíbrio, de compatibilidade e das equações constituintes dos materiais da teoria da elasticidade, desenvolveu as expressões, que hoje em dia, permitem calcular analiticamente os deslocamentos, deformações e tensões em função da profundidade e da distância radial induzidos por uma carga pontual vertical (P), como se pode observar na Figura 2.17.

A carga  $P$  atua sobre superfície de um maciço semi-infinito com material elástico linear, homogêneo e isotrópico. A esta a teoria dá-se o nome de Semi-espço de Boussinesq.

Mais tarde, foram desenvolvidas as equações que permitiam a consideração de carga linear e uniformemente distribuída numa área circular. Mais tarde foi desenvolvida uma metodologia para a carga de placa rígida [Fontul, 2004].

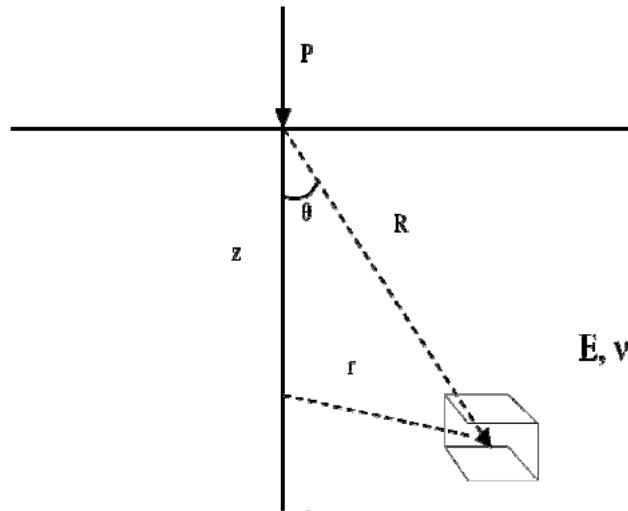


Figura 2.17 Modelo de Boussinesq para uma carga pontual [Fontul, 2004]

É então, nos programas de retro análise que as equações de *Boussinesq* são bastante utilizadas. No entanto, com a evolução da tecnologia, foi possível o desenvolvimento de modelos de sistemas multicamadas que vieram ajudar à necessidade de uma modelação mais adequada da resposta da estrutura real [Fontul, 2004].

Mais tarde surge o *método da espessura equivalente* ou *método de Odemark*. Este método consiste na transformação de um sistema de camadas com diferentes módulos, num sistema onde todas as camadas têm o mesmo módulo, podendo ser possível a utilização das equações de *Boussinesq*. Esta teoria baseia-se no pressuposto de que as tensões e as deformações abaixo de uma camada dependem apenas dessa camada. Admite-se que uma camada de módulo de deformabilidade  $E_1$ , de espessura  $h_1$  e um coeficiente de *Poisson*  $\nu_1$  pode ser semelhante a uma camada de outro material caracterizado por  $E_2$ , e  $\nu_2$ , e com uma espessura equivalente  $h_2$ , desde que tenham a mesma rigidez de flexão  $D$ , Figura 2.18 [Fontul, 2004].

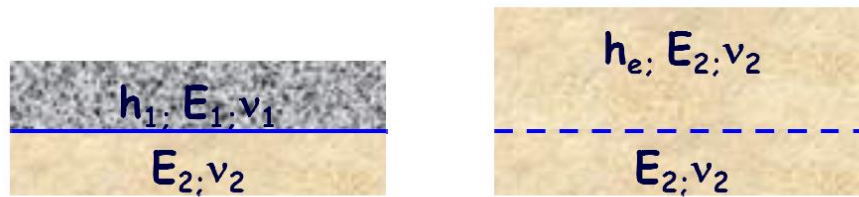


Figura 2.18 Método de Odemark [Fontul, 2004]

Tendo em contas estas condições, a espessura equivalente da camada pode ser determinada por:

$$D = \frac{h^3 E}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.12)$$

$$D_1 = D_2 \quad (2.13)$$

Resulta que:

$$h_e = h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \times \frac{1 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2}} \quad (2.14)$$

O rigor dos resultados obtidos com este método varia entre 89% e 92% dos valores obtidos a partir da teoria da elasticidade [Fontul, 2004].

No ano 1945, Burmister desenvolveu um modelo de cálculo, baseado na teoria da elasticidade, que contribuiu para o desenvolvimento da distribuição das tensões na análise de um sistema estratificado, Modelo de Burmister [Antunes, 1993].

Este modelo considera que o pavimento requer algumas considerações: os materiais das diversas camadas são homogêneos, isotrópicos, e elástico-lineares, e não é considerado qualquer efeito de inércia; as camadas são consideradas contínuas, horizontais e infinitas; todas as camadas têm espessura finita, excepto a fundação, que é considerada como meio espaço semi-infinito; à superfície, a carga é uniformemente distribuída sobre uma área circular; e, o sistema é considerado axissimétrico [Fontul, 2004].

O programa de cálculo automático utilizado no nosso caso de estudo, para a determinação dos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento, foi o BISAR

(*Bitumen Stress Analysis in Roads*), que tem como base de teoria o próximo modelo de cálculo, *Modelo Multicamadas*.

O programa BISAR para análise de pavimentos permite considerar, ainda, que as condições de interface entre camadas podem ser variáveis, desde aderência perfeita até deslizamento sem atrito [Alves, 2007].

De modo a aproximar a modelação o mais possível da realidade, o solo de fundação é então dividido em dois, criando o meio espaço semi-infinito: uma camada superior de espessura definida e uma camada inferior de espessura semi-infinita com características de camada rígida, ou seja, com um módulo de deformabilidade bastante superior à de cima. Este procedimento justifica-se, em alguns casos, pela existência de solos de melhor qualidade, ou até mesmo em rocha, sob a camada inferior. Para o caso de isto não ser verdade, a adoção de uma camada rígida pode ser justificada pelo aumento de pressões de confinamento do solo devido à acção do peso próprio, que tendo em conta o comportamento não linear, em geral deste tipo de materiais, corresponde ao aumento do módulo de deformabilidade com a profundidade [Antunes, 1993].

Para além destes métodos de cálculos falados, existem outro que não serão apresentados neste trabalho, como é o caso do Método dos Elementos Finitos e do Método do Elemento Discreto [Fontul, 2004; Silva, 2009; Fernandes, 2011].

## 2.7 Considerações finais

Os equipamentos seleccionados para efectuarem, no presente trabalho, a avaliação do comportamento das várias infraestruturas em estudo, foram o Defletómetro de Impacto (FWD) e o Defletómetro de Impacto Portátil (DIP). Ambos são equipamentos de ensaios não destrutivos, isto é, não danificam a infraestrutura enquanto realizam o ensaio.

Uma das vantagens do FWD é simular diferentes condições de carregamento, variando os parâmetros de ensaios, tais como, a altura de queda, a massa, o número de amortecedores e, até mesmo, a dimensão da placa de carga. Outra vantagem deste equipamento é a possibilidade de obter uma deformada completa em cada ponto de ensaio.

Por outro lado, este equipamento não permite a realização de ensaios de um modo contínuo ao longo da extensão do pavimento, uma vez que se trata de um realizado estático, e não é possível, para este equipamento, a realização do ensaio a uma velocidade normal de tráfego.

O DIP, sendo um equipamento portátil torna-se mais fácil o seu transporte para qualquer local de difícil acesso a veículos. Tal como o FWD, o DIP também permite simular diferentes condições de carregamento, variando os mesmos parâmetros utilizados no FWD, embora de dimensões e/ou pesos diferentes.

Por outro lado, tem como desvantagens, o limite de carga máxima aplicável, que não ultrapassa de 20 kN e a medição de deflexões, que no máximo é realizada em três pontos.

Para a determinação dos módulos de deformabilidade das diversas camadas do pavimento, foi escolhido, como programa de cálculo base deste trabalho, o programa de cálculo automático BISAR, que, para além de considerar como base de teoria o próximo modelo de cálculo, *Modelo Multicamadas*, permite ainda, definir as condições de interface entre camadas, desde aderência perfeita até deslizamento sem atrito.



### 3 Interpretação dos ensaios de carga

#### 3.1 Apresentação geral

No presente capítulo, apresentam-se os estudos relativos a retroanálise com base nos ensaios de carga não destrutivos do caso de estudo. Assim, descreve-se a metodologia de ensaio, o processo de interpretação e faz-se uma análise de diversos fatores que influenciam os testes e os resultados obtidos.

Para este estudo, foram utilizados dois equipamentos de ensaio não destrutivos, disponíveis no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), fundamentais para análise do comportamento de pavimentos: o deflectómetro de Impacto (FWD) e o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP). Para a sua interpretação foi utilizado um programa de cálculo de elasticidade linear desenvolvido pela SHELL, BISAR 3.

Como base de trabalho, foram submetidas a vários ensaios quatro células de composições estruturais diferentes, que serão apresentadas mais à frente. A célula 1 têm como característica a camada de desgaste em material granular, enquanto que as restantes três células têm, como camada de desgaste, mistura betuminosa (ver Figura 4.1).

Em cada célula foram ensaiados dois alinhamentos distanciados a 0,50 m entre si. Em cada alinhamento foram realizados ensaios em cinco pontos distanciados em cerca de 1,0 m, obtendo assim 10 pontos de ensaio por célula.

Com o FWD foram realizados ensaios de cinco alturas de queda diferentes, correspondentes as forças de pico entre 25 e 120 kN, sendo efectuados três ensaios para cada uma destas alturas, em cada ponto. Para interpretação foi utilizado o último ensaio realizado para cada força. Uma vez que o FWD dispõe de uma viga com nove geofones, como já foi referido no capítulo anterior, para cada ponto ensaiado resultaram nove medições (D1 a D9).

Com o DIP, foi realizada uma medição para cada ponto acima referido, no centro da placa de carga, sendo a força de carga aplicada de 15 kN. Foram realizados duas campanhas de ensaios com o DIP, com temperaturas das camadas betuminosas diferentes (17 e 25°C, respectivamente), o que possibilitou o estudo da influência da temperatura nos resultados obtidos.

No caso dos ensaios com o FWD, de seguida foram determinados os módulos de deformabilidade das diversas camadas de cada célula, através da retroanálises de todos os pontos ensaiados e para todas as forças aplicadas, utilizando o programa linear elástico (BISAR).

Foi estudada a existência de uma camada descolada e a sua influência na caracterização do pavimento, no caso da Célula 3.

No caso dos ensaios com o DIP, foi feita a retroanálise, com base nos modelos estruturais estabelecidos para o caso dos ensaios com o FWD, através da modificação dos módulos da primeira e segunda camada. Foi também realizado um estudo sobre a influência da temperatura nas diversas células; e o cálculo dos erros induzidos nestes ensaios.

De modo a comparar os resultados obtidos com os dois equipamentos, recorreu-se ao cálculo do módulo de deformabilidade equivalente, que será explicado mais a frente. Como tal, serão comparados os módulos de deformabilidade dados pelos equipamentos, como os módulos de deformabilidade retroanalizados pelo programa BISAR, como os módulos de deformabilidade equivalentes calculados para o mesmo caso.

No âmbito deste capítulo será ainda apresentado um estudo relativo a influência da diferença entre a força aplicada e a força de normalização. Assim, foi estudado o efeito da normalização na interpretação de resultados. Isto é, as deflexões medidas para cada ponto, para uma determinada força de carga, foram normalizadas para diferentes forças de carga. Como tal, através das deflexões medidas para uma altura de queda de 25 kN foram calculadas novas deflexões, normalizadas para 50, 75, 90 e 120 kN.

Foi estudada a influência dos erros de medição feitos ao longo deste trabalho e avaliadas as suas consequências.

Geralmente, optou-se por apresentar os resultados obtidos para a Célula 2, como exemplo, no corpo da dissertação, uma vez que é a que melhor caracteriza um pavimento com camada de desgaste em mistura betuminosa. Por vezes, quando é necessário apresentar o caso da camada de desgaste em material granular, será dado como exemplo a célula 1. Os restantes resultados obtidos das outras células encontram-se em anexo.

### **3.2 Descrição do modelo físico ensaiado**

Foram ensaiados quatro tipos de pavimentos reproduzidos em modelo à escala real, construídos no LNEC, usando condições controladas durante a sua construção, pelo que todas as opções escolhidas para os materiais e espessuras foram realizadas para outro trabalho do LNEC.

A Figura 3.1 apresenta um esquema da disposição das quatro células existentes no modelo físico, e o esquema das estruturas de cada uma das células.

A célula 1 é constituída por 0,30 m de material granular granítico na primeira camada, 0,30 m de material granular de natureza calcária na segunda camada e 2,20 m de solo de fundação.

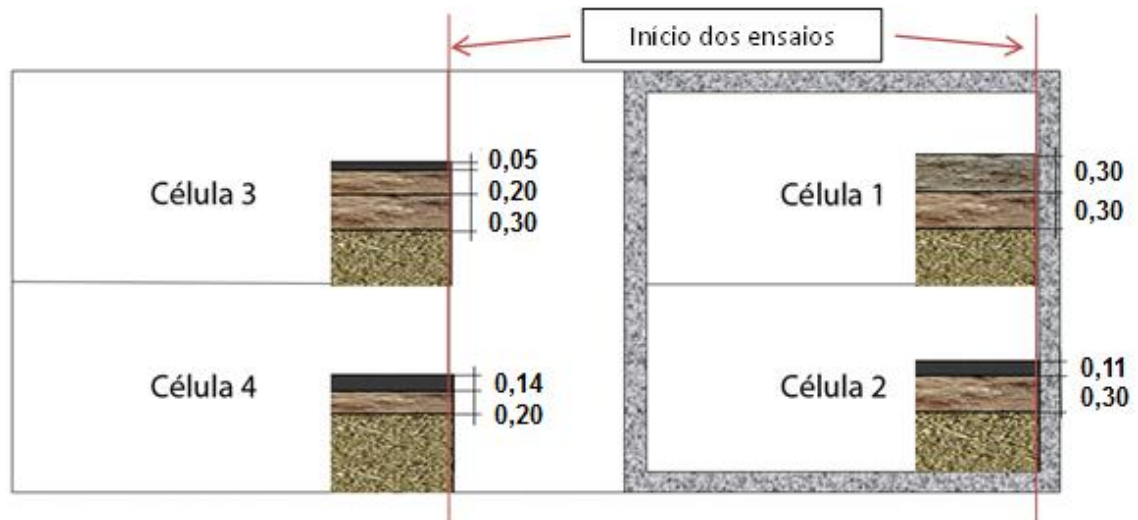


Figura 3.1 Esquema do modelo físico das quatro células

A célula 2 é constituída por 0,11 m de mistura betuminosa, 0,30 m de material calcário e 2,40 m de solo de fundação, exepmplificado em pormenor na Figura 3.2.

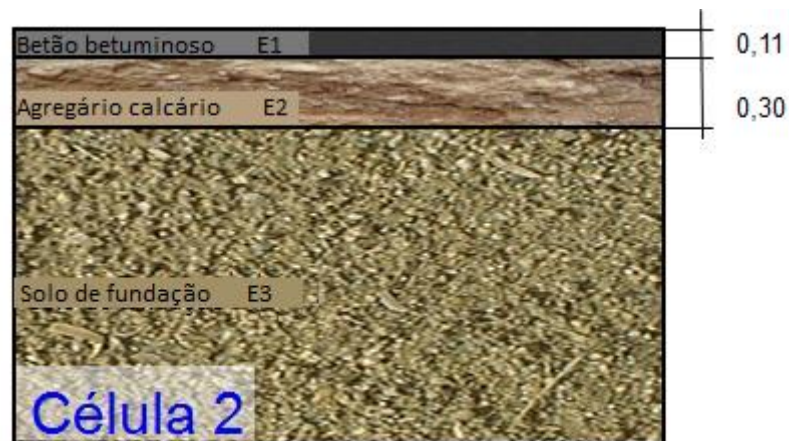


Figura 3.2 Composição da célula 2

Na célula 3 têm-se 0,05 m mistura betuminosa, 0,20 m de material calcário, 0,30 m de material calcário e 2,05 m de solo de fundação.

Por último, a célula 4 é constituída por 0,14 m de mistura betuminosa e 0,20 m de agregado calcário e 2,25 m de solo de fundação.

### **3.3 Ensaios de carga realizados no modelo físico**

Tendo com objetivo a avaliação estrutural dos pavimentos, foram realizados ensaios com o Deflectómetro de Impacto (FWD) e o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP) nas quatro células acima apresentadas.

Em cada célula foram ensaiados dois alinhamentos distanciados a 0,50 m entre si. Em cada alinhamento foram realizados ensaios em cinco pontos localizados a 0,90 m, 1,75 m, 2,65 m, 3,55 m e 4,30 m da margem direita de cada célula (ver Figura 4.1).

Com o FWD foram realizados ensaios de cinco alturas de queda diferentes, correspondentes as forças de pico de: 25, 50, 75, 90 e 120 kN; sendo efectuados três ensaios para cada uma destas alturas, em cada ponto. Assim, para cada ponto ensaiado resultaram nove medições (D1 a D9), sendo D1 a medição feita no centro da placa (0,00 m) e as restantes nas seguintes distâncias da mesma: D2 (0,30 m), D3 (0,45 m), D4 (0,60 m), D5 (0,90 m), D6 (1,20 m), D7 (1,50 m), D8 (1,80 m) e D9 (2,10 m).

Com o DIP, foi realizada uma medição para cada ponto acima referido, no centro da placa de carga, sendo a força de carga aplicada de 15 kN. Em cada ponto foram realizados 5 a 10 ensaios, sendo escolhido para interpretação o ensaio que mais se aproximava do valor médio dos ensaios realizados. Este ensaio foi considerado como representativo.

Foram realizadas duas campanhas de ensaios com o DIP, com temperaturas das camadas betuminosas diferentes (17 e 25°C).

Durante os ensaios, tanto com o FWD como com o DIP, foram realizadas medições da temperatura das camadas betuminosas. Estas medições foram feitas com termómetro digital em furos realizados no pavimento, com profundidades de 0,04 m e 0,08 m, preenchidos com glicerina para garantir a uniformização da temperatura.

As temperaturas medidas foram utilizadas para a correção do Módulo de elasticidade da mistura betuminosa para a temperatura de projeto (ver 3.5.4).

### **3.4 Interpretação dos ensaios realizados com o FWD**

#### **3.4.1 Pré-processamento de dados – normalização e filtragem**

Ao serem utilizados estes tipos de equipamentos, têm de se fazer sempre uma normalização da força pretendida. Quando se pretende fazer um ensaio para uma força dada, é escolhida a altura de queda necessária para induzir esta força. No entanto a força real aplicada difere sensivelmente de ensaio para ensaio. O equipamento tem um sistema que

mede a força real aplicada. Assim, para poder comparar as deflexões medidas em ensaio deferentes é preciso normalizar estas deflexões para uma força só, a pretendida inicialmente. Recomenda-se que a diferença entre a força aplicada e a força de normalização não seja muito grande. No âmbito deste capítulo será apresentado um estudo relativo a influência da diferença entre a força aplicada e a força de normalização. Dando como exemplo os ensaios feitos para 25 kN, os resultados obtidos para as diversas medições, podem ter forças ligeiramente diferentes: 24, 24,5, 25,4 ou até mesmo 26 kN, e de modo a uniformizar estas medições, é feita uma normalização (correspondência) para os 25 kN. Deste modo equivalem-se então as deflexões obtidas para umas correspondentes a uma força de 25 kN.

Com o FWD são geralmente realizados três medições para cada altura de queda. Por norma, a primeira medição é apenas uma adaptação da placa ao terreno, não sendo deste modo considerada para análise, e só são consideradas as medições a partir da segunda medição. Por isso, optou-se pela terceira medição, embora a segunda sirva como reserva de algum ponto que esteja com erros na 3ª medição.

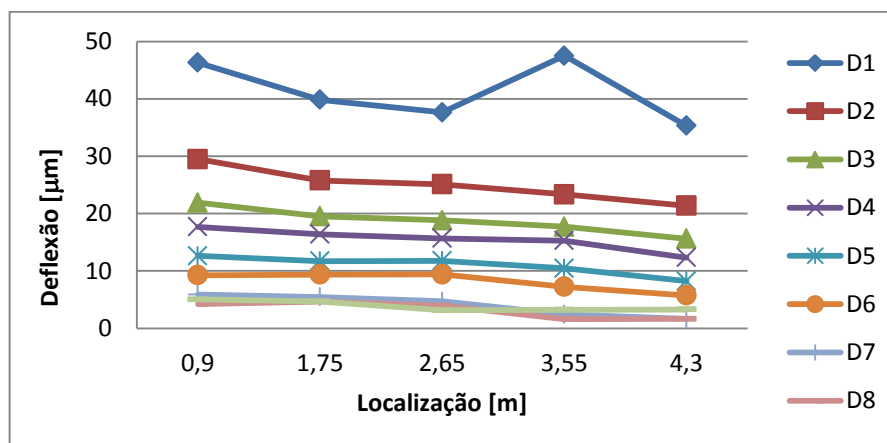
Procedeu-se à retroanálise de todos os ensaios efetuados. No corpo da dissertação, serão geralmente apresentados, como exemplo, os resultados da célula 2, sendo os restantes resultados apresentados em anexo.

O Quadro 3.1 apresenta as medições realizadas com o FWD, na célula 2 na localização 0,90 m, para todas as alturas de carga, nomeadamente para as forças de 25, 50, 75, 90 e 120 kN.

**Quadro 3.1** Deflexões obtidas pelo Deflectómetro de Impacto (FWD) para a célula 2 à temperatura 17°C

Dist. (m)	D1 (μm)	D2 (μm)	D3 (μm)	D4 (μm)	D5 (μm)	D6 (μm)	D7 (μm)	D8 (μm)	Força (kN)
0,90	46	29	22	18	13	9	6	5	25
0,90	46	30	22	18	13	9	6	5	25
0,90	46	29	22	18	13	9	6	4	25
0,90	98	63	49	38	26	19	13	10	50
0,90	99	62	48	38	26	19	13	10	50
0,90	97	63	49	38	26	19	13	10	50
0,90	152	98	77	60	41	30	20	17	75
0,90	153	99	77	60	41	30	20	16	75
0,90	154	99	78	61	41	30	20	16	75
0,90	191	124	97	74	50	35	25	20	90
0,90	194	126	97	76	51	35	26	21	90
0,90	195	126	98	76	51	35	26	21	90
0,90	272	176	136	104	69	48	34	27	120
0,90	277	178	138	105	69	48	35	28	120
0,90	281	180	139	106	69	49	35	28	120

Para ter uma perceção global da resposta do pavimento, para uma carga aplicada de 25 kN, é apresentada a Figura 3.3, a distribuição das deflexões medidas em cada geofone ao longo de um alinhamento ensaiado na célula 2.

**Figura 3.3** Deflexões medidas na célula 2, normalizadas para uma carga de 25 kN

### 3.4.2 Processo de retroanálise

Depois de obtidas estas deflexões, é através do programa de cálculo BISAR que é feita a retroanálise para todos os pontos, sendo necessário, para utilização deste programa de cálculo, acrescentar uma camada semi-infinita à camada de solo de fundação, ficando assim com a camada 4 bastante mais rígida. Por sua vez, de modo a homogeneizar cada camada,

foram feitas várias tentativas de retroanálise para os diferentes pontos ensaiados (10, 5 em cada alinhamento) em sintonia com as cinco diferentes forças e para as quatro células apresentadas.

Para a utilização deste programa, é necessário definir três características de cada estrutura no programa: a carga aplicada na superfície do pavimento e a sua localização; as características das camadas do pavimento, com as respectivas espessuras, os seus módulos de deformabilidade e os coeficientes do *Poisson*; e a posição dos pontos onde se pretende obter a deflexão devida à carga.

As cargas aplicadas, a espessura das camadas e a posição da determinação das deflexões mantêm-se inalteráveis para todas as zonas do trecho em estudo, para cada uma das células. A carga vertical aplicada corresponde à força padrão que se pretende estudar (25, 50, 75, 90 e 120 kN) utilizada nos ensaios com o Deflectómetro de Impacto, com uma placa de raio 0,15 m.

Os pontos onde se pretende determinar a deflexão devida à aplicação da carga circular correspondem à posição dos sensores (geofones) do ensaio de carga, distribuídos linearmente pela superfície do pavimento de D1 a D9.

Os módulos de deformabilidade vão sendo ajustados conforme as deflexões medidas em cada ponto de ensaio.

Os coeficientes de *Poisson* que foram adotados para a definição do modelo de comportamento estrutural, foram os geralmente utilizados pelo LNEC. Assim, adotou-se para as misturas betuminosas um coeficiente de *Poisson* de 0,35, enquanto para as camadas granulares e de fundação valores de coeficientes de *Poisson* de 0,35 (solos de fundação mais argilosos apresentam coeficiente de *Poisson* mais elevado).

Nas estruturas analisadas consideraram-se as seguintes camadas: a camada de desgaste em agregado granítico (célula 1) e em mistura betuminosa (células 2, 3 e 4) com a respetiva espessura; uma camada de regularização em agregado calcário, também com espessura definida; uma camada superior de solo de fundação com a espessura pré-definida; e uma camada, que corresponde a parte inferior do solo de fundação de espessura semi-infinita.

Após várias iterações, foi verificada a aproximação entre a deformada calculada pelo programa de cálculo BISAR e a deformada real obtida pelos Deflectómetros (tanto FWD como o DIP), adotando-se como critério de paragem do processo de iteração, a minimização do valor do RMS (Root Mean Square), nomeadamente da raiz quadrada dos valores médios dos quadrados das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas divididas pelos valores médios [Domingos, 2007].

$$RMS(\%) = \left( \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

em que:  $n$  – número total de geofones utilizados;

$d_{ci}$  – deflexão calculada no geofone  $i$  [ $\mu\text{m}$ ];

$d_{mi}$  – deflexão medida no geofone  $i$  [ $\mu\text{m}$ ].

Para valores de RMS inferiores a 10% considerou-se que o conjunto de módulos de deformabilidade apresentava um grau de aproximação aceitável. Nestes casos, a deformada calculada aproxima-se de forma satisfatória da deformada real. Na Figura 3.4 encontra-se um exemplo da retroanálise da célula 2.

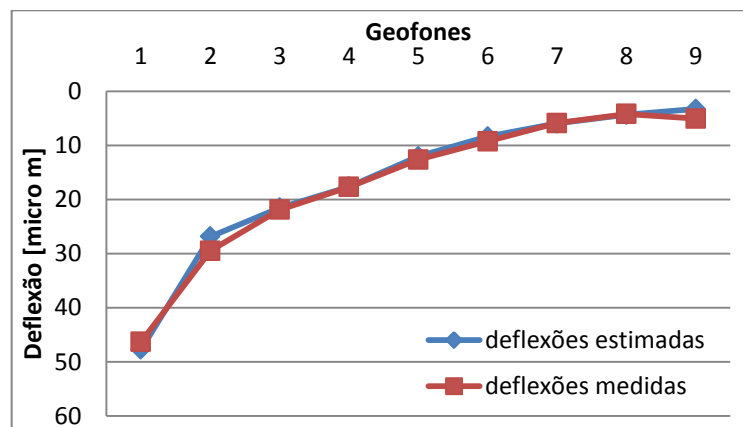


Figura 3.4 Retroanálise da célula 2 para 25 kN à distância 0,90m

Através deste processo iterativo é possível identificar a contribuição das várias camadas constituintes do pavimento para a deformada medida nos ensaios de carga para os pavimentos em estudo.

Teve-se em consideração, que as deflexões medidas nos geofones mais próximos do local de aplicação da carga traduzem a resposta estrutural do pavimento e da fundação em conjunto, enquanto nos sensores mais distantes, a resposta estrutural está condicionada pelas camadas inferiores do pavimento e pela fundação. Ou seja, a deflexão registada no sensor D1 é o reflexo do conjunto da estrutura total (pavimento e fundação), enquanto que, as deflexões registadas nos sensores mais afastados D7-D9, traduz na sua essência a resposta da fundação à carga aplicada.

Por este método, é então possível determinar os módulos de deformabilidade para as diferentes camadas existentes em cada célula. Como exemplo, o Quadro 3.2 apresenta os resultados obtidos através da retroanálise para as deflexões medidas na célula 2.



**Quadro 3.2 Módulos de Deformabilidade E (MPa) para a célula 2**

Força (kN)	Distância (m)	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	5000	5000	5000	3000	5000
	E2	3000	6000	6000	3000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	8000	5000	6000	4000	8000
	E2	2000	5000	5000	2000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
75	E1	6000	7000	7000	4000	6000
	E2	4000	5000	5000	5000	3000
	E3	400	400	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	5000	6000	6000	3000	5000
	E2	3000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	800
	E4	1000	1000	1600	1500	1500
120	E1	3000	4000	5000	2000	4000
	E2	4000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	700
	E4	1000	1000	1600	1500	1500

Sendo: E1 a E4 – Módulos de Deformabilidade (MPa) de várias camadas (Figura 3.2)

No Quadro 3.3 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos com o BISAR, na retroanálise de um dos ensaios, com a comparação entre as deflexões medidas e calculadas, e o respetivo RMS.

**Quadro 3.3 RMS do ponto à distância 0,90 m na célula 2**

Distância (m)	Camada	Espessura (m)	Módulo	Coeficiente de Poisson	Deflexões ( $\mu\text{m}$ )			Erro	RMS
			(MPa)		Medidas	Calculadas	Diferença	%	
0,9	1	0,11	5000	0,35	46	48	-2	3,06	5,85
	2	0,30	3000	0,35	29	27	2	8,89	
	3	2,40	500	0,35	22	22	0	1,70	
	4		1500	0,35	18	18	0	0,24	
					13	12	1	4,68	
					9	8	1	9,60	
					6	6	0	1,05	
					4	4	0	3,42	
					5	3	2	35,08	

### 3.4.3 Análise dos resultados

Para uma observação mais detalhada sobre os módulos de deformabilidade, foram analisadas, para cada força, a ordem de grandeza dos módulos considerados para cada distância.

No gráfico da Figura 3.5, estão representadas essas comparações para o caso da célula 2, com a aplicação da força de 25 kN.

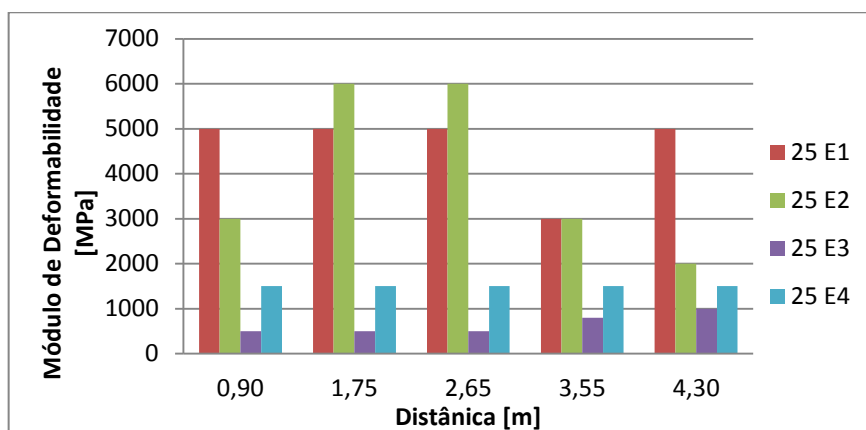


Figura 3.5 Módulos de Deformabilidade da célula 2, para 25 kN

Na Figura 3.6, apresenta-se uma comparação dos módulos estimados para as várias forças aplicadas durante a realização dos ensaios, para cada distância de ensaio, na célula 2.

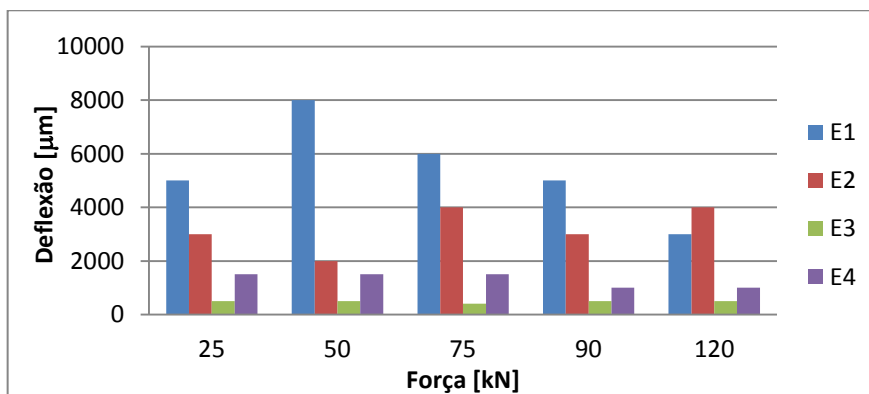


Figura 3.6 Módulo de Deformabilidade da célula 2 para a distância de 0,90 m

Tem-se na Figura 3.7, apresentados os módulos de deformabilidade obtidos para a primeira camada, da célula 2, para as diversas forças aplicadas, de modo a permitir uma análise comparativa do comportamento da camada betuminosa quando solicitada por diferentes níveis de carga.

Observa-se que há uma tendência de evolução dos módulos similar em todas as distâncias ensaiadas, registando-se uma diminuição do módulo com o aumento da força aplicada, para forças acima de 75 kN.

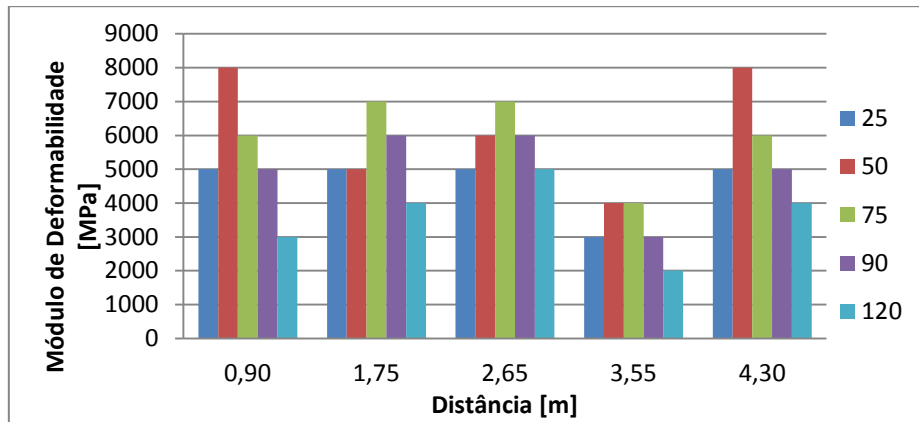


Figura 3.7 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1) para a célula 2

Constata-se também alguma variação com a força de carga, dos módulos de deformabilidade da segunda camada, granular, como é perceptível na Figura 3.8.

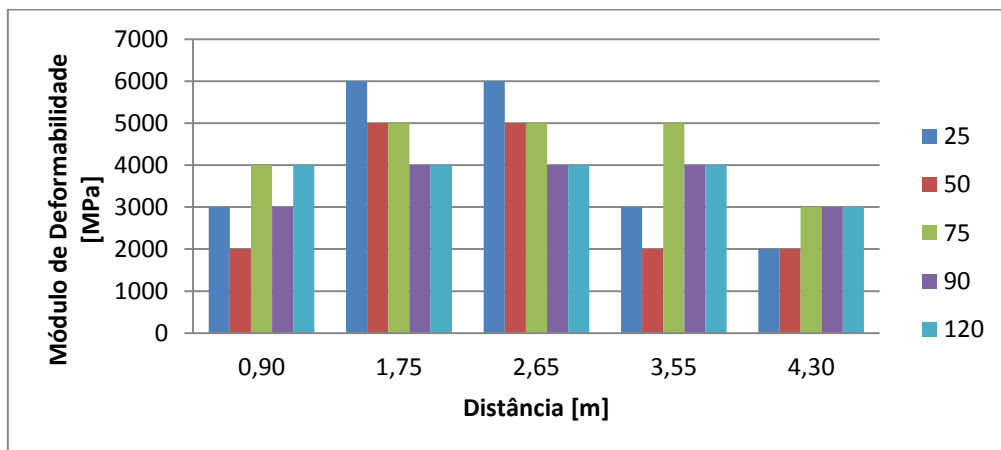


Figura 3.8 Módulos de Deformabilidade (MPa) da segunda camada (E2) para a célula 2

Todas estas comparações foram feitas para todas as células, distâncias e forças estudadas, os resultados sendo apresentados em anexo.

Na Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11 apresentam-se os módulos estimados para a primeira camada das células 1, 3 e 4, respetivamente.

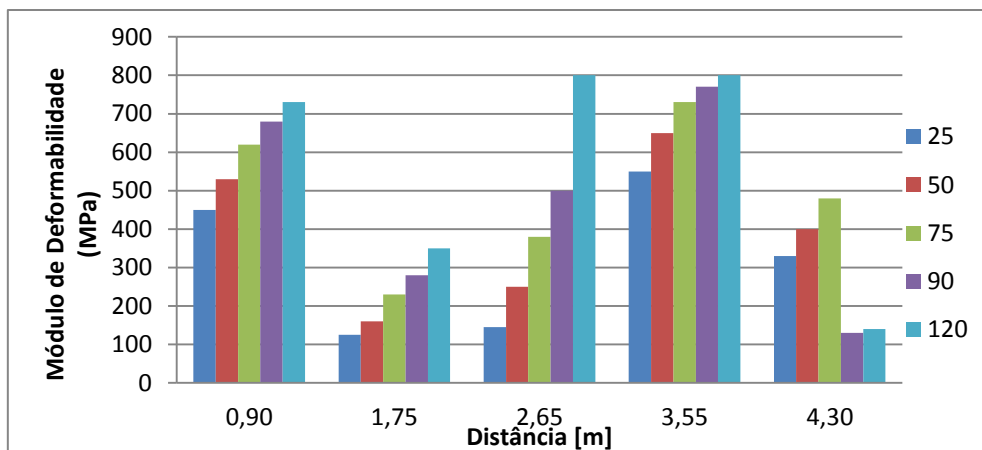


Figura 3.9 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 1

Assim, observa-se que no caso da célula 1 ocorre um aumento do valor do módulo da primeira camada (E1) com o aumento da força aplicada, o que geralmente acontece no caso de materiais granulares.

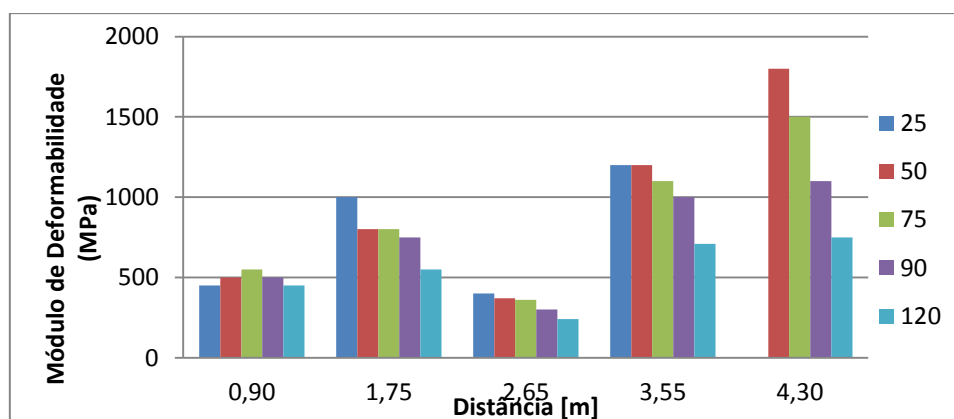


Figura 3.10 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 3

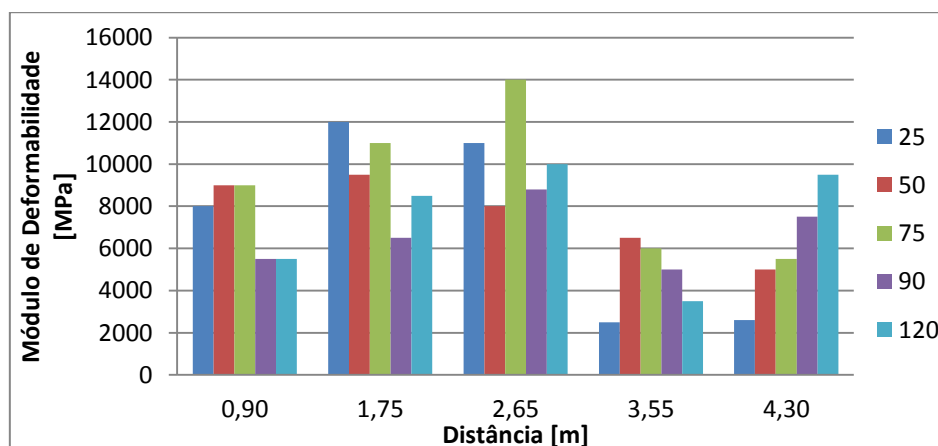


Figura 3.11 Módulos de Deformabilidade (MPa) da primeira camada (E1) para a célula 4

No caso das células com camada superior em misturas betuminosas, células 2, 3 e 4, a tendência geral é de uma diminuição do módulo de deformabilidade com o aumento da força de carga, mais evidente no caso da célula 3 e em geral para as forças acima de 75 kN.

#### 3.4.4 Consideração da camada parcialmente descolada

No decorrer da retroanálise da célula 3, foi detetada, através das deflexões obtidas pelo deflectómetro de impacto, a possível existência de uma camada desligada, a primeira camada, nomeadamente a de mistura betuminosa. Ao ser referido esta camada como “desligada”, na realidade, ela considera-se como parcialmente descolada. Este tipo de situação pode ser derivado de um mau processo de construção, de impregnação insuficiente, com emulsão, na da colocação da última camada. A Figura 3.12 apresenta as deflexões medidas na Célula 3.

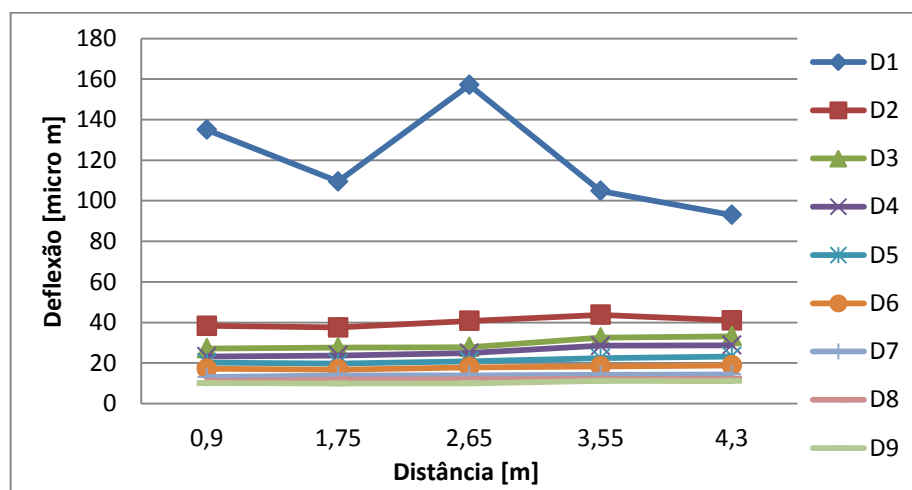


Figura 3.12 Deflexões obtidas na célula 3, para uma força de 50 kN

Como se pode observar, na Figura 3.12, as medições no centro da placa de carga (D1) encontram-se bastante destacadas das outras. Isto é, não existe, praticamente, qualquer tipo de transmissão de forças.

Como tal, é então possível afirmar que a primeira camada, correspondente à camada de mistura betuminosa, está desligada das camadas abaixo. Isto faz com que a estrutura não funcione em harmonia com o resto das camadas e a torne pouco eficiente na sua função.

Do mesmo modo que foram avaliadas as outras células, através da retroanálise, foi igualmente analisada a célula 3, assumindo que se tratava de uma infraestrutura normal, ligação total (camada ligada), e posteriormente considerando-se a primeira camada parcialmente desligada (camada desligada), que mais tarde será essa estrutura a base de trabalho para esta célula.

No Quadro 3.4, fica-se com uma percepção dos diversos valores dos módulos de deformabilidade obtidos no caso da retroanálise considerando as camadas com ligação total. Nota-se que os valores obtidos são pouco realistas, principalmente os da segunda camada.

**Quadro 3.4 Módulo de Deformabilidade E (MPa) para a célula 3, considerando ligação total**

Força	Dist.	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30*
25	E1	260	430	260	600	-
	E2	8000	8500	5500	5000	-
	E3	500	500	500	500	-
	E4	1000	1000	1000	1000	-
50	E1	270	400	240	590	1300
	E2	8000	8500	5500	5000	4000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	260	330	200	590	500
	E2	15000	15000	9000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
90	E1	240	330	180	550	400
	E2	15000	10000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
120	E1	220	240	150	470	310
	E2	15000	20000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800

\*para 25 kN, não foram realizados ensaios nesta localização.

Analisando os valores para os módulos de deformabilidade obtidos pelo BISAR, observa-se uns módulos de deformabilidade correspondentes às primeira e segunda camadas (E1 e E2 respetivamente) bastante desadequados. Como camada de misturas betuminosas têm-se módulos à volta de 400 MPa, e para a camada granular, os valores rondam os 8000 MPa. Seria de esperar, como já foi visto em cima, valores para a primeira camada à volta de 5000 MPa e para a camada granular, sempre mais baixa, por volta de 3000 MPa.

Através da Figura 3.13, observa-se a grande diferença entre os módulos da primeira e segunda camada (E1 e E2). Por exemplo, para os ensaios da altura de queda de 75, 90 e 120 kN, o E2 chega mesmo a tomar valores da ordem dos 15000 MPa, equivalentes a camadas tratadas com cimento. Por sua vez, a camada de misturas betuminosas tem módulos baixíssimos.

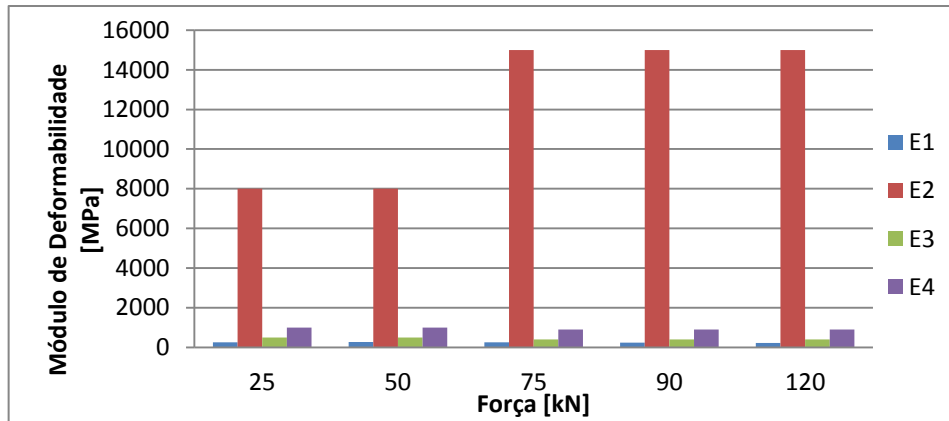


Figura 3.13 Módulos de Deformabilidade da célula 3 à distância 0,90 m, camada ligada

Feito este reparo, e tendo em conta a diferença entre as deflexões D1 e D2, como visível na Figura 3.13, considerou-se oportuno estudar esta célula assumindo ter uma camada desligada.

No programa de cálculo BISAR existe essa possibilidade. Na secção onde se colocam as definições das layer (das camadas), existe um campo que pergunta sobre a aderência das camadas. Se se encontram totalmente aderentes, “Full Friction Between Layer”, ou se há apenas uma conformidade entre elas, “Standard Spring Compliance” ou “Reduced Spring Compliance” (ver Figura 3.14). Colocando a opção pretendida, é preciso assinalada a camada que se encontra descolada, neste caso é a primeira, logo coloca-se o devido coeficiente,  $SC=15$  m, apenas nessa camada. O valor foi adotado com base na experiência do LNEC [Antunes e Fontul, 2006] que remete para um  $SC=15$  m, correspondente a um coeficiente  $1/K_T = 1,2 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{N}$ .

O processo de retroanálise é repetido para a célula 3, mas agora considerando camada desligada, e são retirados assim os novos valores de módulos de deformabilidade. No Quadro 3.5 são apresentados os valores obtidos.

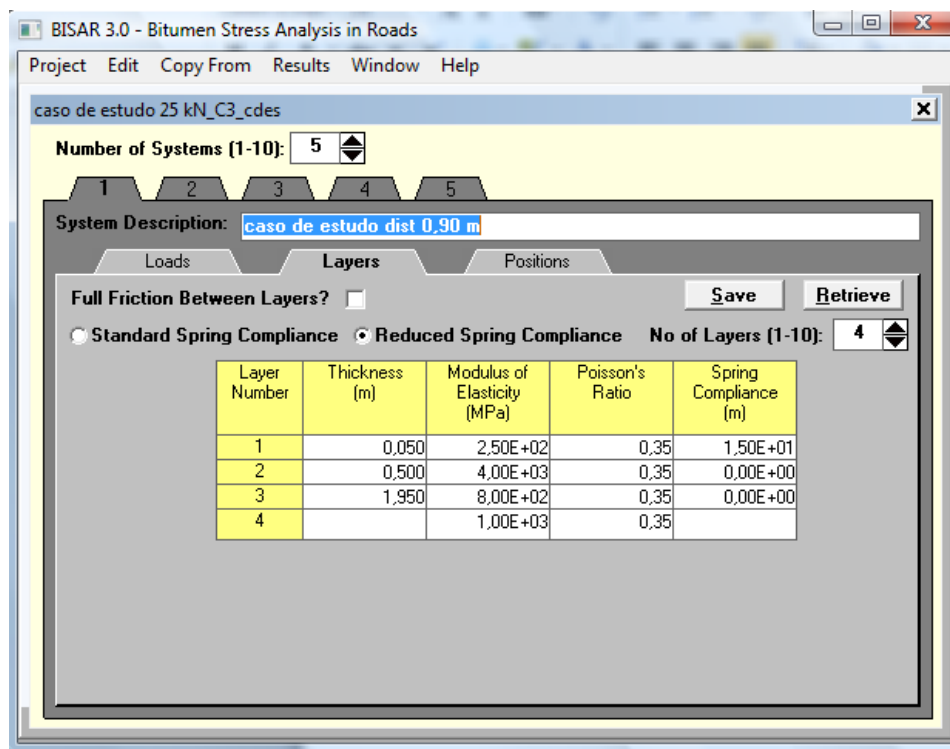


Figura 3.14 BISAR, camada desligada

Quadro 3.5 Módulo de Deformabilidade E (MPa) para a célula 3 (considerando camada desligada)

Força	Dist.	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	450	1000	400	1200	-
	E2	4000	4000	4000	4000	-
	E3	800	800	700	600	-
	E4	1000	1000	1000	1000	-
50	E1	500	800	370	1200	1800
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	700	800	700	600	600
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	550	800	360	1100	1500
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	750	750	700	600	600
	E4	1000	1000	900	1000	1000
90	E1	500	750	300	1000	1100
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	700	700	600	600	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
120	E1	450	550	240	710	750
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	800	800	700	600	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000



Como se pode observar, os valores E1 subiram apenas ligeiramente, não esquecendo que esta camada foi considerada como parcialmente desligada, mas o mais importante, o E2 já tem valores dentro do intervalo esperado, 4000 MPa.

Nas Figura 3.15 e Figura 3.16 apresentam-se os módulos das primeiras duas camadas obtidas considerando a camada com ligação total e parcial.

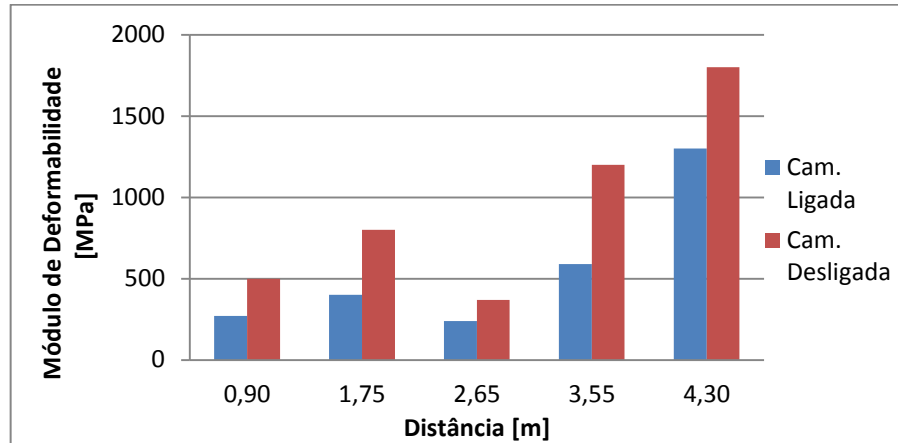


Figura 3.15 Módulo de Deformabilidade da camada 1, com a força de 50 kN considerando camada ligada e desligada

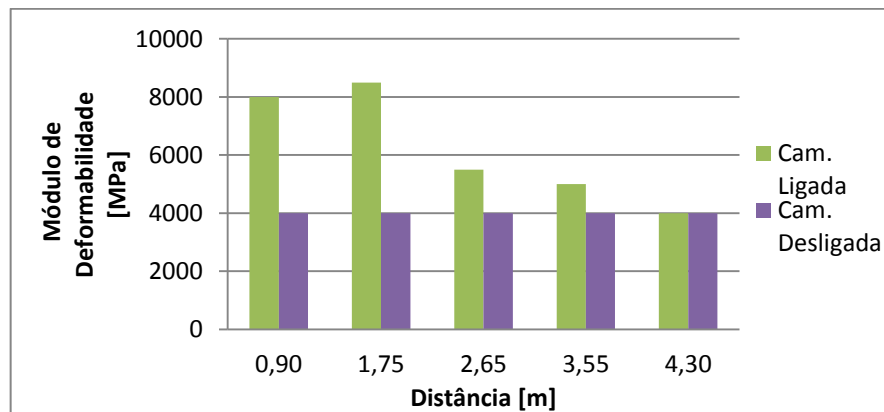


Figura 3.16 Módulo de Deformabilidade da camada 2, com a força de 50 kN considerando camada ligada e desligada

Comparando, especificamente a primeira camada, a partir do Quadro 3.6, repara-se num aumento substancial, para o dobro, dos valores obtidos na retroanálise considerado camada totalmente ligada para os valores obtidos considerando a camada parcialmente desligada.

No caso da segunda camada, o módulo obtido no caso em que se considera a camada parcialmente desligada é bastante inferior aos módulos obtidos anteriormente, considerando a camada ligada.

**Quadro 3.6 Comparação dos E1 e E2 obtidos considerando a camada betuminosa ligada vs desligada**

		E1		E2	
Força (kN)	Distância (m)	Camada ligada (MPa)	Camada desligada (MPa)	Camada ligada (MPa)	Camada desligada (MPa)
25	0,90	260	450	8000	4000
	1,75	430	1000	8500	4000
	2,65	260	400	5500	4000
	3,55	600	1200	5000	4000
	4,30	-	-	-	-
50	0,90	270	500	8000	4000
	1,75	400	800	8500	4000
	2,65	240	370	5500	4000
	3,55	590	1200	5000	4000
	4,30	1300	1800	4000	4000
75	0,90	260	550	15000	4000
	1,75	330	800	15000	4000
	2,65	200	360	9000	4000
	3,55	590	1100	5000	4000
	4,30	500	1500	9000	4000
90	0,90	240	500	15000	4000
	1,75	330	750	10000	4000
	2,65	180	300	8000	4000
	3,55	550	1000	5000	4000
	4,30	400	1100	9000	4000
120	0,90	220	450	15000	4000
	1,75	240	550	20000	4000
	2,65	150	240	8000	4000
	3,55	470	710	5000	4000
	4,30	310	750	9000	4000

Como será estudado mais a frente, estes pavimentos, já considerados danificados, têm um período de vida útil bastante mais reduzido. Necessitarão assim de um reforço ou de uma nova camada de regularização.

### 3.5 Interpretação dos ensaios realizados com o DIP

#### 3.5.1 Pré-processamento de dados – normalização e filtragem

No âmbito deste estudo foram também ensaiadas, as mesmas 4 células acima descritas (ver Figura 3.1), nos mesmos pontos, com o deflectómetro de impacto portátil (DIP), para avaliação e possíveis comparações com o FWD.

Para este equipamento, são precisos certos cuidados durante o ensaio. Sabendo que este aparelho é portátil, e apesar do seu transporte e ensaio parecerem mais intuitivos, é por este mesmo motivo que este equipamento pode ter uma margem de erro maior. O fato do operador tem que segurar no equipamento, garantir a estabilidade da placa de ensaio, de impulsionar a carga de ensaio e de travar o peso no seu regresso após aplicação, torna-o mais sujeito a erros.

Como tal, as primeiras pancadas, devido ao ajustamento/adaptação do terreno, devem ser ignoradas., sendo apenas contabilizadas, para efeitos de cálculo, as pancadas seguintes.

Como no caso do FWD, também para o DIP as deflexões devem ser normalizadas para a força pretendida, neste caso para 15 kN.

Como já referido, é obtido apenas um valor de deflexão em cada ponto de ensaio, no centro da placa, que comparando com o FWD equivale ao D1, uma vez que não tem geofones adicionais. Deste modo, uma comparação dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes dos pavimentos ensaiados, pelos dois métodos de ensaio – FWD e DIP - é mais difícil de realizar. Se tivesse sido colocada a “viga auxiliar”, seria possível obter uma visão mais abrangente das diferentes camadas constitutivas da célula.

Por fim, devem ser analisados todos os valores, e escolhido o ponto que melhor caracterize o ensaio. Neste caso, considerou-se representativo o ensaio cujo valor se aproxima mais do valor médio de uma serie de ensaios realizados num ponto.

No Quadro 3.7 apresentam-se as medições efetuadas na célula 2, os pontos considerados representativos (a negrito), sendo os restantes ensaios com o DIP apresentadas em anexo.

Quadro 3.7 Resultados dos ensaios do DIP para a célula 2

Célula	Distância (m)	Módulos	Leitura	Pico Força	D1	Força Normalizada	D1 Normalizada	Média	Valor a usar
		(MPa)		(kN)	( $\mu\text{m}$ )	(kN)	( $\mu\text{m}$ )		
C2	0,90	3085,7	1	15,15	18,28	15	18,10	17,83	17,81
		3111,4	2	15,35	18,37	15	17,95		
		<b>3136,7</b>	<b>3</b>	<b>15,35</b>	<b>18,23</b>	<b>15</b>	<b>17,81</b>		
		3103,4	4	15,29	18,34	15	18,00		
		3154,5	5	15,21	17,96	15	17,71		
		3139,5	6	15,23	18,07	15	17,79		
	1,75	3478,5	1	15,34	16,42	15	16,06	16,91	17,48
		3407,5	2	15,31	16,73	15	16,39		
		3415,1	3	15,39	16,78	15	16,36		
		3429,7	4	15,25	16,56	15	16,28		
		3187,8	5	15,19	17,75	15	17,53		
		<b>3195,9</b>	<b>6</b>	<b>15,89</b>	<b>18,51</b>	<b>15</b>	<b>17,48</b>		
	2,65	3224,4	1	15,26	17,62	15	17,32	17,24	17,22
		3319,8	2	15,55	17,44	15	16,82		
		<b>3242,8</b>	<b>3</b>	<b>15,38</b>	<b>17,66</b>	<b>15</b>	<b>17,22</b>		
		3212,8	4	15,42	17,87	15	17,38		
		3233,7	5	15,14	17,43	15	17,27		
		3284	6	15,23	17,27	15	17,01		
		3231,6	7	15,21	17,53	15	17,29		
	3,55	417,2	1	15,10	134,76	15	133,91	166,57	177,60
		216,8	2	15,42	264,83	15	257,65		
		431,6	3	15,36	132,58	15	129,44		
		349,9	4	15,33	163,16	15	159,66		
		288,2	5	15,25	197,12	15	193,83		
		260,8	6	15,32	218,70	15	214,18		
		<b>314,5</b>	<b>7</b>	<b>15,28</b>	<b>180,90</b>	<b>15</b>	<b>177,60</b>		
		1134,2	8	15,24	50,05	15	49,26		
		447,9	9	15,40	128,05	15	124,74		
	4,30	3687,8	2	15,53	15,68	15	15,15	15,75	15,79
		3621,4	3	15,41	15,85	15	15,42		
		3580,2	4	15,59	16,21	15	15,60		
		<b>3536,8</b>	<b>5</b>	<b>15,43</b>	<b>16,25</b>	<b>15</b>	<b>15,79</b>		
		3569,8	6	15,49	16,16	15	15,65		
		3534,3	7	15,31	16,14	15	15,81		
		3498,9	8	15,16	16,13	15	15,96		
		3564,3	9	15,45	16,15	15	15,68		

Devido a dificuldades verificadas no decorrer dos ensaios, não foi possível, na primeira campanha de ensaios com o DIP, efetuar a medição das deflexões para todas as distâncias da Célula 1, sendo ensaiada só uma localização nomeadamente a 3,55 m. A primeira campanha de ensaios foi realizada com uma temperatura no pavimento durante o ensaio de 17°C. Tratando-se de um material granular, e tendo em conta que a temperatura não têm relevância no comportamento destes materiais, optou-se por substituir para efeitos de análise de dados, os ensaios desta campanha a 17°C, pelos da campanha a seguir, realizada a 25°C.

Apresentam-se, no Quadro 3.8, as deflexões medidas durante as duas campanhas de ensaios como também os módulos de deformabilidade estimados pelo DIP. Têm-se a primeira campanha, 17°C, designada por *DIP 1*, e a segunda campanha, com 25°C, por *DIP 2*.

**Quadro 3.8 Medições realizadas em ambas as campanhas com o DIP**

Célula	Distância (m)	DIP 1 (17°C)		DIP 2(25°C)	
		Deflexão (μm)	E1 (MPa)	Deflexão (μm)	E1 (MPa)
C1	0,90	-	-	372	160
	1,75	-	-	258	232
	2,65	-	-	407	147
	3,55	253	221	225	266
	4,30	-	-	208	286
C2	0,90	18	3137	34	1755
	1,75	17	3196	23	2601
	2,65	17	3243	22	2724
	3,55	178	315	33	1836
	4,30	16	3537	19	3127
C3	0,90	67	839	56	1058
	1,75	30	1880	42	1421
	2,65	53	1051	123	486
	3,55	51	1085	33	1827
	4,30	47	1181	250	239
C4	0,90	23	2434	41	1457
	1,75	24	2328	25	2354
	2,65	29	1895	33	1799
	3,55	33	1686	34	1736
	4,30	40	1413	41	1466

De forma a ser possível comparar os resultados obtidos nos ensaios realizados com o DIP e com o FWD, foram também normalizadas as deflexões obtidas com o DIP (15 kN) para

uma força de normalização de 25 kN, e analisadas em pormenor em 3.6, na parte da comparação dos equipamentos FWD e DIP.

Para este estudo, ter-se-á como referência o ensaio DIP 1, completado com dados da campanha DIP 2, nos pontos acima referidos da Célula 1.

### 3.5.2 Processo de retroanálise

Utilizando o mesmo método de cálculo anteriormente apresentado, foi efetuada a retroanálise para 15 kN e para cada situação através do programa de cálculo BISAR.

Nas figuras abaixo, Figura 3.17, Figura 3.18, Figura 3.19 e Figura 3.20, encontram-se, apenas, as curvas ajustadas das deflexões medidas pelo DIP no ensaio, nomeadamente para a força de 15 kN, *DIP\_15*, e calculadas pelo BISAR, *BISAR\_15*, com base nos modelos estruturais de cada célula.

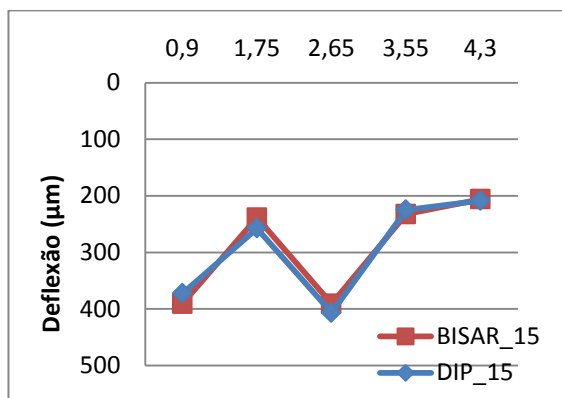


Figura 3.17 Deflexões medidas e calculadas - Célula 1

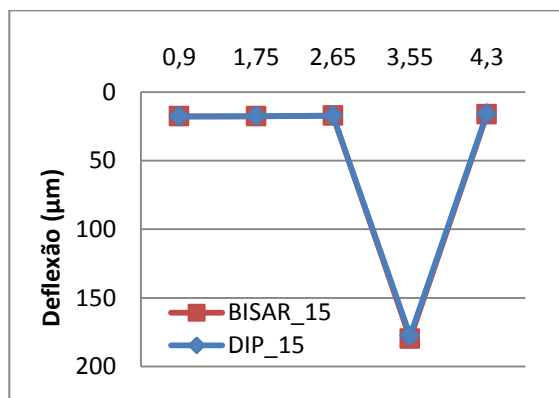


Figura 3.18 Deflexões medidas e calculadas - Célula 2

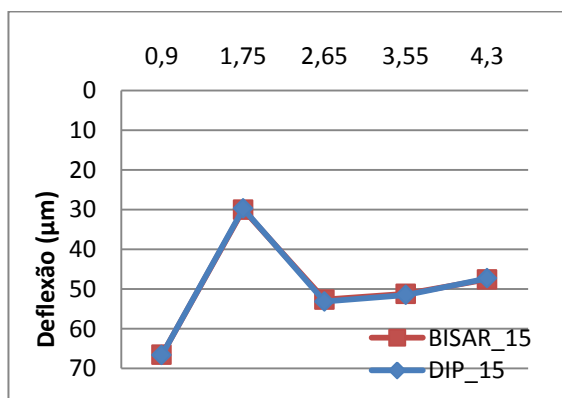


Figura 3.19 Deflexões medidas e calculadas - Célula 3

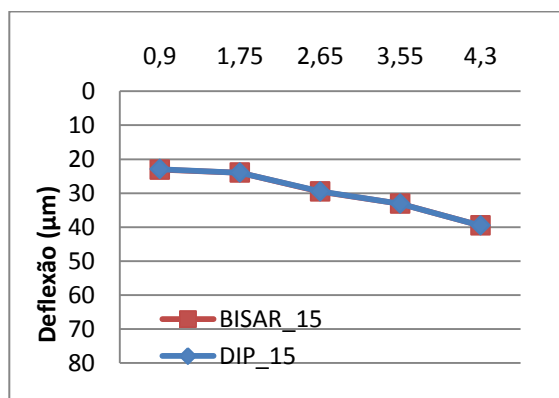


Figura 3.20 Deflexões medidas e calculadas - Célula 4

Conforme se pode observar, o ponto distanciado a 3,55 m do ponto inicial, da célula 2, encontra-se, porém, afastado dos outros. Como é perceptível, no decorrer de todos os ensaios medidos nesse ponto, este encontra-se sempre em discrepância relativamente aos outros

pontos da mesma célula. Presume-se então, que seja devido à instrumentação instalada no pavimento.

Para melhor leitura, apresentam-se no Quadro 3.9 as deflexões medidas com o DIP na primeira campanha, *DIP\_15*, e as calculadas com base nos modelos estruturais estabelecidos através da retroanálise com o programa Bisar, *BISAR\_15*.

**Quadro 3.9 Deflexões medidas pelo DIP, normalizadas para 15 kN, e calculadas pelo BISAR**

Célula	Distância (m)	DIP_15 D1 (μm)	BISAR_15 D1 (μm)
C1	0,90	372	391
	1,75	258	239
	2,65	407	391
	3,55	225	232
	4,30	208	206
C2	0,90	18	18
	1,75	17	18
	2,65	17	17
	3,55	178	180
	4,30	16	16
C3	0,90	67	67
	1,75	30	30
	2,65	53	53
	3,55	51	51
	4,30	47	48
C4	0,90	23	23
	1,75	24	24
	2,65	29	30
	3,55	33	33
	4,30	40	40

Uma vez que os modelos estruturais com base nos ensaios com o deflectómetro de impacto já tinham sido feitos, foi com base nestes que foi realizado o ajustamento para acertar a deflexão central medida com o DIP. Como já foi referido, com o uso do DIP, apenas seria possível esta estimativa com os outros dois geofones auxiliares do equipamento, que para este estudo não foram utilizados.

Uma vez que se trabalha apenas com o D1, e que o diâmetro da placa de carga é de 0,30 m, considera-se que a influência deste ensaio faz-se mais sentida nas camadas de topo de cada célula (até uma profundidade aproximada de 0,30 m). Assim, no processo de retroanálise com base nos modelos estruturais estabelecidos para o FWD, fez-se o ajustamento dos valores

apenas através da modificação dos módulos das camadas 1 e 2, E1 e E2, respetivamente. Com esta retroanálise, foram obtidos módulos de deformabilidade dentro do intervalo esperado para cada tipo de material. No Quadro 3.10 encontram-se os módulos calculados com o BISAR para os ensaios a 15kN.

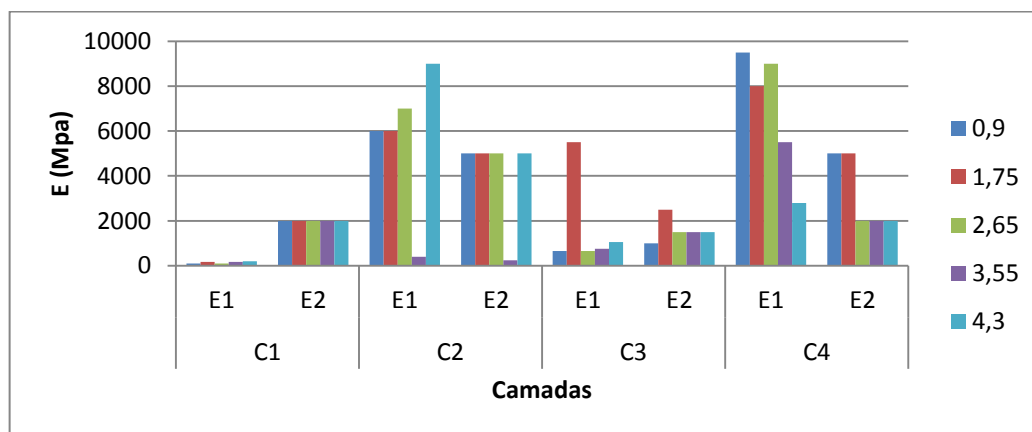
**Quadro 3.10 Módulos de Deformabilidade E (MPa) para o DIP a 15 kN**

BISAR - 15kN						
Célula	Dist.	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
C1	E1	100	170	100	175	200
	E2	2000	2000	2000	2000	2000
C2	E1	6000	6000	7000	400	9000
	E2	5000	5000	5000	250	5000
C3	E1	650	5500	650	750	1050
	E2	1000	2500	1500	1500	1500
C4	E1	9500	8000	9000	5500	2800
	E2	5000	5000	2000	2000	2000

### 3.5.3 Análise dos resultados

De um modo geral, tem-se então módulos de deformabilidade muito similares entre cada camada das células estudadas.

Analisando globalmente, através da Figura 3.21, tem-se em conta, ainda, que em algumas células, as diversas distâncias tomam o mesmo valor para as diferentes camadas.



**Figura 3.21 Módulos de Deformabilidade para E1 e E2 para o DIP 15 kN**



### 3.5.4 Consideração do efeito da temperatura

Como já referido, foram realizadas duas campanhas de ensaios com o DIP, com temperaturas das camadas betuminosas diferentes (17 e 25°C).

No caso dos materiais betuminosos, cujo módulo de deformabilidade sofre o efeito da temperatura, terá de haver uma correcção da temperatura medida em campo, para uma temperatura de projecto.

É então, através da equação (3.2), corrigido o  $E$ , medido a uma dada temperatura ( $T$ ), para uma temperatura de projecto de 20°C.

$$E_T \equiv (1,635 - 0,0317 \times T) \times E_{20} \quad (3.2)$$

Sendo:  $E_T$  – o módulo de deformabilidade para a temperatura  $T$ ;

$E_{20}$  – módulo de deformabilidade corrigido para 20°C;

$T$  – temperatura do pavimento durante a realização dos ensaios.

Note-se que a célula 1, por a camada 1 ser em material granular, não é afectada pela temperatura.

No Quadro 7.15, em anexo, estão representados os módulos de deformabilidade dados pelo DIP,  $E$  dado, e os respectivos módulos corrigidos para a temperatura de projecto,  $E$  dado  $T-20^\circ\text{C}$ , para ambas as medições, 17 e 25°C, respectivamente.

Na Figura 3.22, estão representados, lado a lado, os módulos de deformabilidade dados pelo DIP para ambas as campanhas: sendo o primeiro o ensaio feito a 17°C,  $E$  dado 17°C, e para segundo ensaio feito a uma temperatura de 25°C,  $E$  dado 25°C.

Observando os vários módulos de deformabilidade dados pelo DIP, para as duas medições, constata-se que existem pequenas diferenças entre si. Como espectável, em geral, os módulos medidos para a temperatura mais alta, 25°C, são inferiores aos obtidos para 17°C.

Na Célula 2, observa-se uma coerência entre os diversos pontos, embora, o ponto 3,55 m não se enquadre nesta análise.

A Célula 3 apresenta valores de módulos de deformabilidades bastante diferentes quando comparadas as duas temperaturas.

Na Célula 4, os valores dos módulos de deformabilidade, dados pelo DIP para as duas temperaturas, são os que se encontram mais próximos, chegando a ter diferenças inferiores a 100 MPa. Apenas no ponto 0,90 m se verifica uma diferença de 1000 MPa.

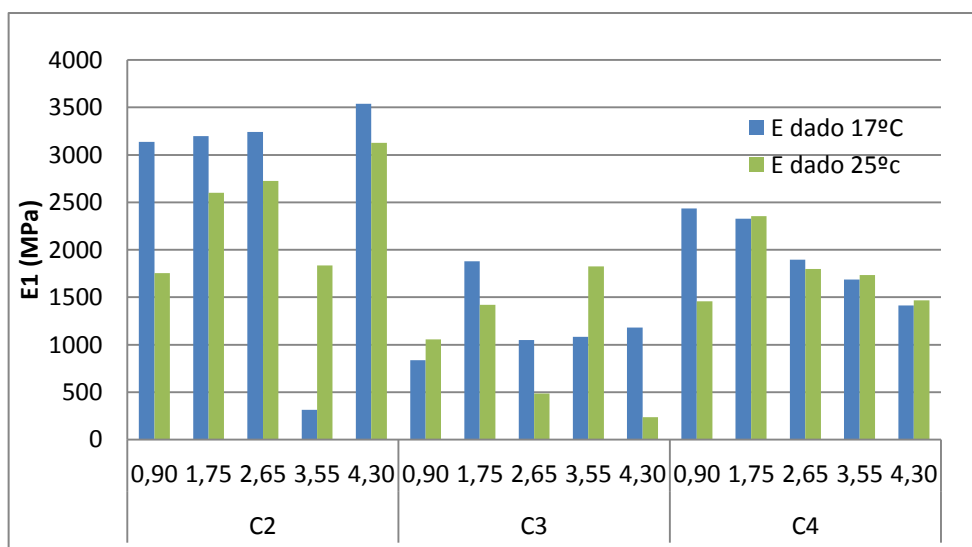


Figura 3.22 Módulos de deformabilidade dados pelo DIP para as duas campanhas

Na Figura 3.23, encontram-se os módulos de deformabilidade dados pelo DIP e corrigidos para a temperatura de projecto,  $E_{\text{dado } T-20^{\circ}\text{C}}$ , dos dois ensaios realizados.

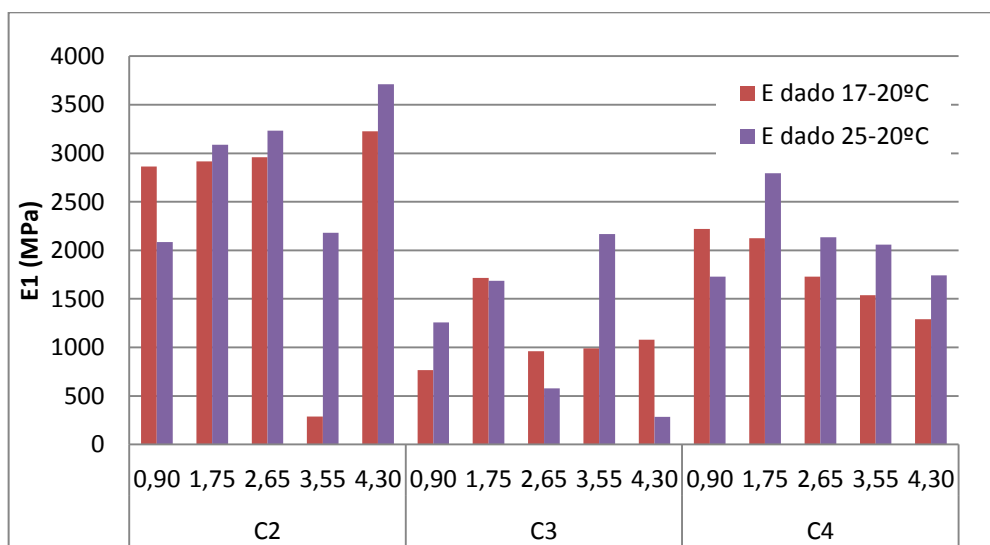


Figura 3.23 Módulos de deformabilidade dados pelo DIP e corrigidos para 20°C

Era de esperar que os módulos das duas campanhas, corrigidos para a temperatura de 20° C fossem muito aproximados, no entanto observam-se diferenças entre eles. Pelos valores dos módulos de deformabilidade resultantes das correcções das temperaturas, observa-se que, de um modo geral, as diferenças obtidas no gráfico anterior Figura 3.22, onde estão representados apenas os módulos de deformabilidade dados pelo DIP, também se observam neste gráfico mas com ligeiras diferenças. No caso da célula 2, os módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura projeto encontram-se com a mesma diferença, obtida entre os módulos de deformabilidade dados, ou com diferenças menores. Para a célula 3, não existe

coerência nas diferenças obtidas. Em alguns pontos, a diferença entre uma temperatura e a outra é menor, noutros pontos, essa diferença é superior.

No caso da célula 4, observa-se uma maior diferença entre os módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de projeto, do que os módulos de deformabilidade dados para as diferentes temperaturas. Contrariamente ao esperado, no ponto 0,90 m, a diferença obtida entre os dois módulos de deformabilidade corrigidos é menor.

A Figura 3.24 representa os diversos módulos de deformabilidades que têm vindo a ser comparados: o módulo de deformabilidade dado pelo DIP medido para 17°C, *E dado 17°C*, o respetivo módulo de deformabilidade corrigidos para a temperatura de projeto, *E dado 17 – 20°C*, o módulo de deformabilidade dado pelo DIP medido a 25°C, *E dado 25°C*, e o respetivo módulo de deformabilidade corrigido para a temperatura de projeto, *E dado 25 – 20°C*.

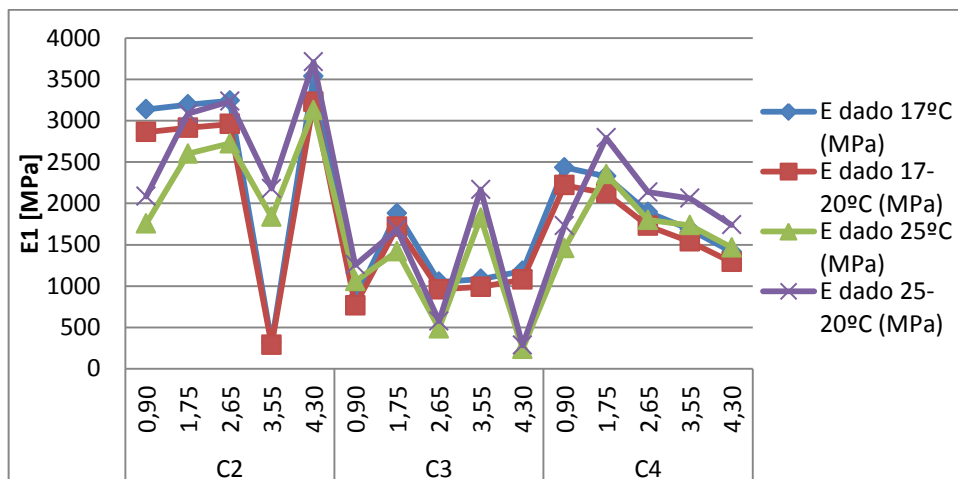


Figura 3.24 Módulos de Deformabilidade dados pelo DIP

De igual modo, encontram-se em anexo, o Quadro 7.16 e o Quadro 7.17, onde estão calculados, para os mesmos ensaios referidos anteriormente, DIP 1 e DIP 2, os módulos de deformabilidade da primeira camada (E1) retroanalizados pelo BISAR à duas temperaturas, e as suas respetivas correções para a temperatura de projeto.

Na Figura 3.25, estão representados os módulos de deformabilidade da primeira camada, retroanalizados pelo BISAR para os dois ensaios feitos pelo DIP a duas diferentes temperaturas, 17°C, *E retroanalizado pelo BISAR 17°C*, para 25°C, o *E retroanalizado pelo BISAR 25°C*.

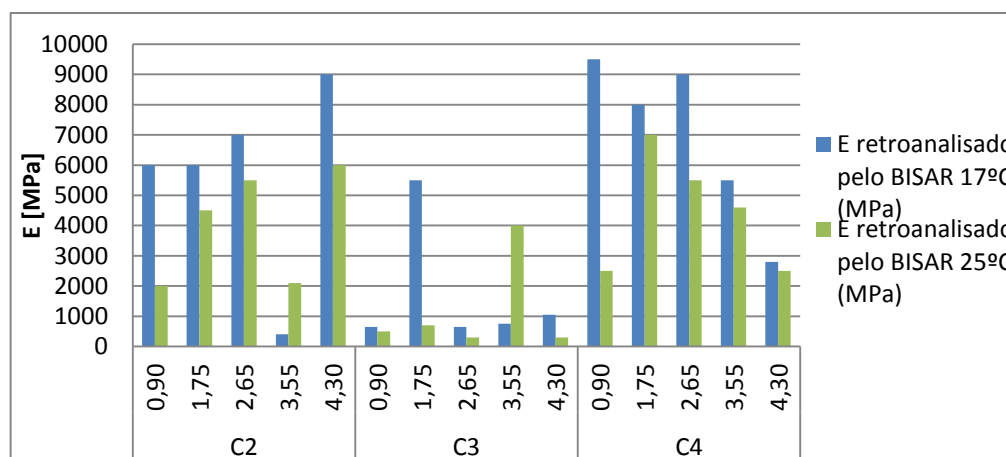


Figura 3.25 Módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR para as duas campanhas

A primeira ideia que se tira deste gráfico é a ordem de grandeza destes módulos, que comparados com os módulos dados pelo DIP para as duas temperaturas, Figura 3.22, são bastante superiores. Observa-se, ainda, que as diferenças obtidas para as duas temperaturas, são, geralmente, maiores quando comparando os módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR, do que os módulos dados pelo DIP.

Na Figura 3.26, abaixo, estão representados os módulos de deformabilidade das camadas betuminosas, retroanalizados pelo BISAR, para as duas temperaturas, corrigidos para a temperatura de projecto. Sendo *E retroanalizado pelo BISAR 17 – 20°C*, os módulos de deformabilidade estimados pelo BISAR para uma temperatura de 17°C e corrigidos para a temperatura de projecto (20°C), e o *E retroanalizado pelo BISAR 25 – 20°C*, os módulos de deformabilidade estimados pelo BISAR para uma temperatura de 25°C e corrigidos para a temperatura de projecto (20°C).

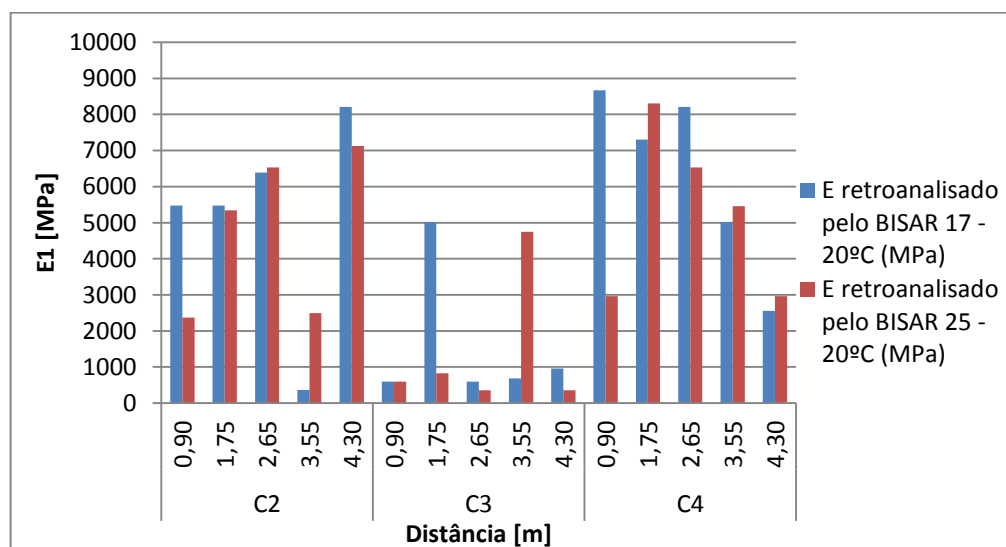


Figura 3.26 Módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR e corrigidos para 20°C

Comparando os dois gráficos acima, da Figura 3.25 e Figura 3.26, observa-se uma diminuição das diferenças obtidas para os módulos de deformabilidade retroanalizados corrigidos, comparativamente aos módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR.

Observa-se, ainda, no ponto 0,90 m, da célula 3, o módulo de deformabilidade retroanalizado pelo BISAR e corrigido para a temperatura projecto é o mesmo para as duas temperaturas diferentes, 17 e 25°C.

Na Figura 3.27 seguinte, encontram-se os módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR, e os corrigidos para a temperatura projecto, das duas medições a temperaturas diferentes.

De uma forma geral, os módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR obtidos para as duas temperaturas e respetivas correções para a temperatura projeto, encontram-se com a mesma ordem de grandeza. Logo, a diferença associada a esses módulos de deformabilidade é pequena.

Por sua vez, existem pontos onde existe uma grande discrepância entre os módulos de deformabilidade retroanalizados e as respetivas correções a uma dada temperatura, com os módulos de deformabilidade retro analisados e corrigidos de outra temperatura.



Figura 3.27 Módulos de Deformabilidade retroanalizados pelo BISAR para as duas campanhas

### 3.6 Comparação entre os resultados obtidos com o FWD e com o DIP

#### 3.6.1 Módulo equivalente

Uma outra forma de comparar os resultados obtidos com os dois tipos de equipamentos, deflectómetro de impacto (FWD) e o deflectómetro de impacto portátil (DIP), é através do Módulo Equivalente. Esta abordagem facilita, por exemplo, a extrapolação dos resultados para o caso de não poder ser realizados os ensaios com o FWD e serem feitos ensaios com o DIP.

Para análise das medições e comparação com os valores já obtidos neste estudo, é necessário fazer alguns ajustes.

Como foi efetuado para as outras análises, será tido como exemplo a célula 1, referente ao material granular, e a célula 2 para as misturas betuminosas. Como será demonstrado mais à frente, o material granular, conforme as suas características, sofre uma maior influência do assentamento da placa. As deflexões medidas na célula 1 foram bastante superiores às outras células. Como o comportamento dos dois materiais da camada 1 é diferente, achou-se oportuno estudar cada caso em particular.

Para obter o módulo de deformabilidade equivalente, esse é calculado através da equação (3.3), abaixo apresentada.

$$E_{equivalente} = \frac{2 \times (1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times r}{D_1} \quad (3.3)$$

Sendo:  $\nu$  (coeficiente de *Poisson*) = 0,35;

$\sigma_0$  (pressão):  $\sigma_0 = \frac{F}{A}$ ;

F (força) = 25 kN;

A (área):  $A = \pi \times r^2$ ;

r (raio) = 0,15 m;

$\pi = 3,1415..$ ;

e  $D_1$  = medição no centro da placa de carga.

#### 3.6.2 Análise comparativa

De forma a ser possível comparar os resultados obtidos nos ensaios realizados com o DIP e com o FWD, as deflexões obtidas com o DIP (15 kN) foram normalizadas para uma força de normalização de 25 kN.

No Quadro 3.11 apresentam-se as deflexões medidas com o DIP no ensaio e normalizadas para duas forças estudadas, nomeadamente para 15 kN, *DIP\_15*, e para 25 kN, *DIP\_25*.

**Quadro 3.11 Medições feitas pelo DIP e normalizadas para 15 e 25 kN**

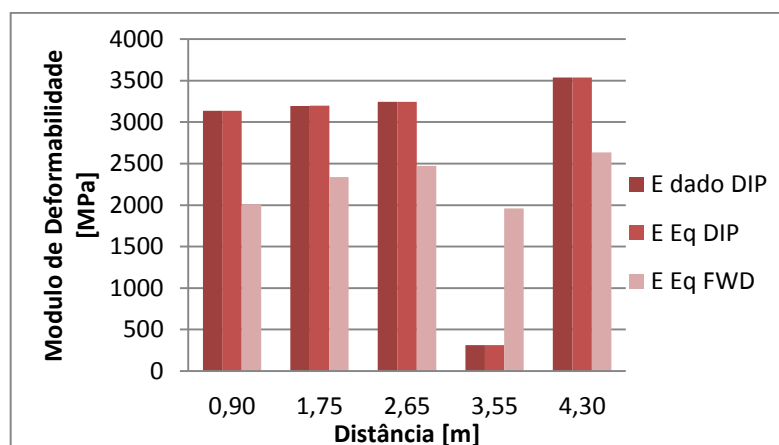
Célula	Distância (m)	DIP_15 D1 (μm)	DIP_25 D1 (μm)
C1	0,90	372	621
	1,75	258	429
	2,65	407	678
	3,55	225	375
	4,30	208	347
C2	0,90	18	30
	1,75	17	29
	2,65	17	29
	3,55	178	296
	4,30	16	26
C3	0,90	67	111
	1,75	30	50
	2,65	53	89
	3,55	51	86
	4,30	47	79
C4	0,90	23	38
	1,75	24	40
	2,65	29	49
	3,55	33	55
	4,30	40	66

Têm-se, no Quadro 3.12, disposto em colunas, os seguintes dados: as deflexões centrais (D1) medidas pelo DIP e normalizadas para 25 kN (*DIP 25 D1*); as deflexões centrais medidas pelo FWD para uma altura de queda que gere um impacto correspondente a 25 kN (*FWD 25 D1*); o módulo de deformabilidade estimado pelo DIP durante a medição (E dado DIP); o módulo de deformabilidade equivalente calculado com base no *DIP 25 D1* (E Eq. DIP); o módulo de deformabilidade equivalente calculado com base no *FWD 25 D1*, (E Eq. FWD); por último, o módulo da primeira camada retroanalisado com BISAR para o ensaio de 25 kN com o FWD (E1 *FWD\_BISAR*), respetivamente.

**Quadro 3.12 Módulos de Deformabilidade Equivalentes para 25 kN (DIP e FWD)**

Força	Célula	Distância (m)	D1 (μm)		E Equivalente (MPa)			E1 (MPa)
			DIP 25 D1 (μm)	FWD 25 D1 (μm)	E dado DIP (MPa)	E Eq DIP (MPa)	E Eq. FWD (MPa)	E1 FWD BISAR (MPa)
25 kN	C1	0,90	621	154	160	150	606	450
		1,75	429	526	232	217	177	125
		2,65	678	464	147	137	201	145
		3,55	375	147	266	248	632	550
		4,30	347	203	286	268	460	330
	C2	0,90	30	46	3137	3137	2010	5000
		1,75	29	40	3196	3196	2337	5000
		2,65	29	38	3243	3243	2474	5000
		3,55	296	48	315	315	1960	3000
		4,30	26	35	3537	3537	2636	5000
	C3	0,90	111	69	839	839	1341	450
		1,75	50	52	1880	1881	1808	1000
		2,65	89	76	1051	1051	1219	400
		3,55	86	52	1085	1085	1786	1200
		4,30	79	-	1181	1181	-	-
	C4	0,90	38	42	2434	2434	2240	8000
		1,75	40	44	2328	2327	2101	12000
		2,65	49	53	1895	1894	1761	11000
		3,55	55	74	1686	1686	1266	2500
		4,30	66	78	1413	1413	1193	2600

Na Figura 3.28, nota-se a proximidade de valores entre os módulos dados pelo DIP e os módulos equivalentes calculados com base na deflexões centrais, normalizadas para 25 kN. No entanto existe alguma diferença entre estes e o módulo equivalente calculado com base na deflexão central medida com o FWD, sendo este geralmente mais baixo.



**Figura 3.28 Módulos medido pelo DIP e módulos equivalentes (FWD e DIP) para 25 kN – Célula 2**



Na Figura 3.29 são apresentados comparativamente os módulos retroanalizados com o BISAR para a primeira camada (E1) e os módulos equivalentes calculados para o FWD, enquanto na Figura 3.30 apresentam-se os mesmo módulos retroanalizados (E1) em comparação com os módulos dados pelo DIP. Constata-se uma grande diferença entre os módulos retroanalizados para a primeira camada e os módulos equivalentes, no caso da Célula 2 (C2). As comparações relativas às restantes células, são apresentadas, na Figura 3.32, e Figura 3.34, respectivamente.

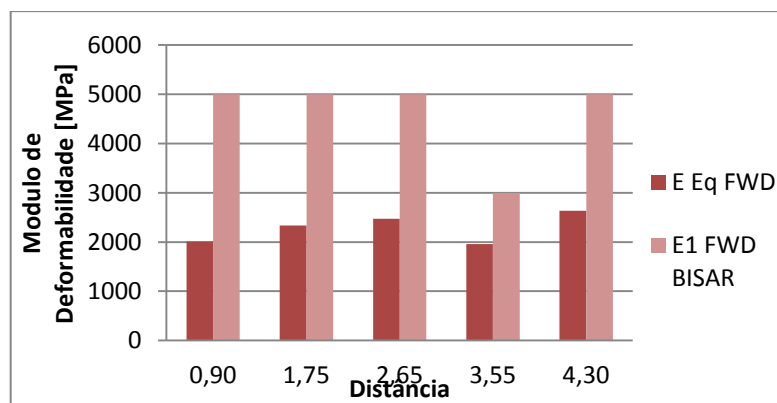


Figura 3.29 Módulo de Deformabilidade para o FWD a 25 kN – Célula 2

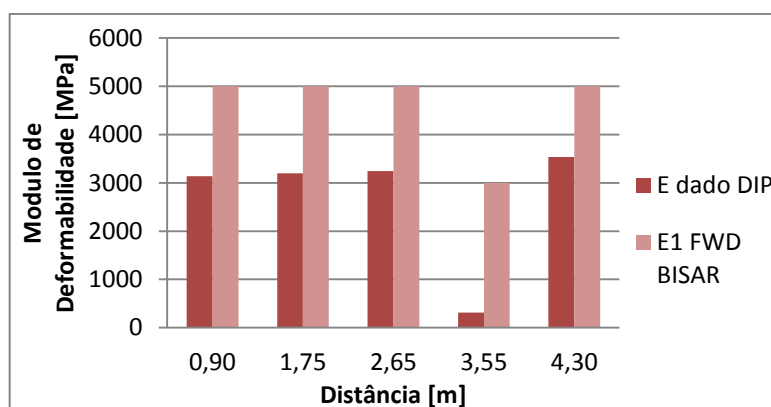


Figura 3.30 Módulos de deformabilidade para o DIP e FWD – Célula 2

Ficando com um apanhado geral dos módulos, temos na Figura 3.31, os módulos obtidos para o ensaio do DIP a 15 kN e normalizado para 25 kN, tanto o módulo dado pelo equipamento, como o módulo equivalente calculado.

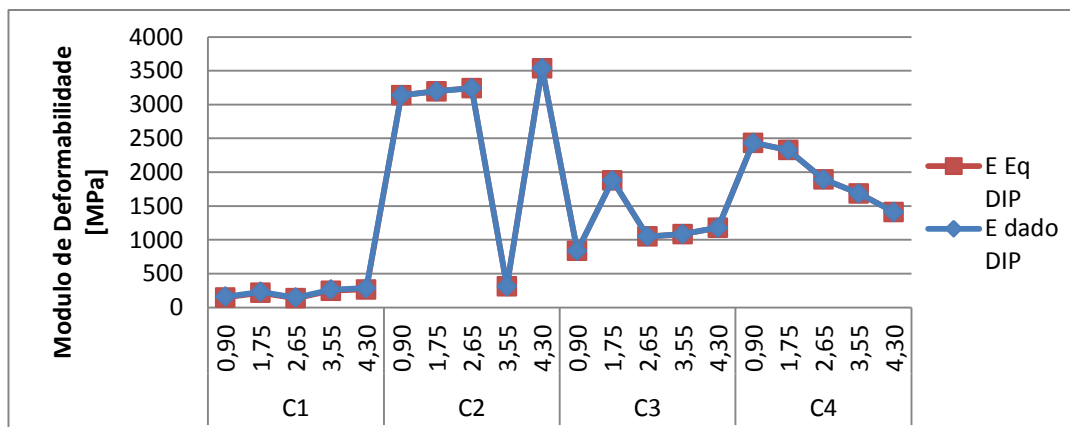


Figura 3.31 Módulos de Deformabilidade obtidos e calculados através do DIP

De igual forma, têm-se os módulos calculados para o ensaio feito pelo FWD para 25 kN, tanto o módulo equivalente calculado, como o módulo da primeira camada retroanalizado com o BISAR. Como é visível, na Figura 3.32, as células 2 e, principalmente, a 4 são as que mostram uma discrepância maior entre os dois valores.

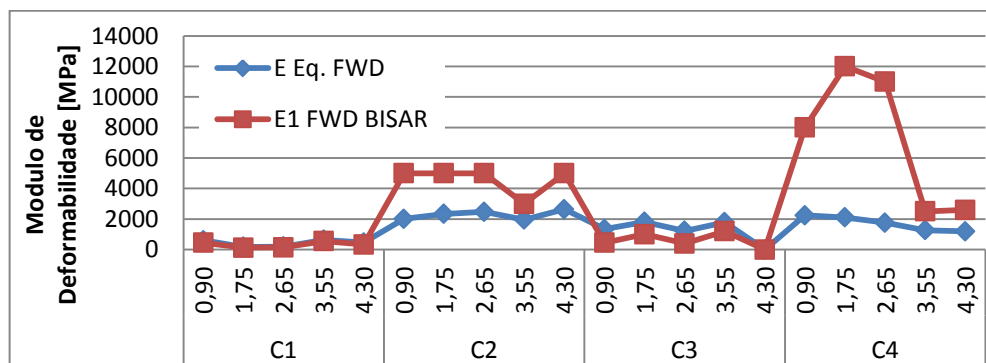


Figura 3.32 Módulos de Deformabilidade calculados através do FWD

As comparações mais importantes a reter desta análise são entre o módulo de deformabilidade dado pelo DIP, medido durante o ensaio (15 kN) (E dado DIP), o módulo de deformabilidade equivalente calculado com base no D1 obtido com o FWD para 25 kN (E Eq. FWD), e o módulo retroanalizado do FWD para a primeira camada (E1 FWD BISAR).

Como primeira comparação, tem-se o módulo dado pelo DIP com o módulo equivalente calculado para o ensaio feito pelo FWD a 25 kN. Esta comparação está representada na Figura 3.33.

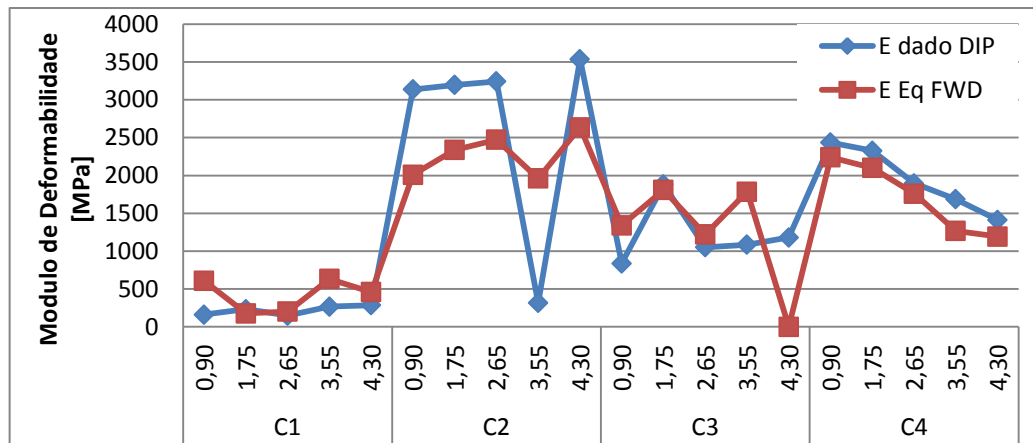


Figura 3.33 Módulo de Deformabilidade dado pelo DIP vs o Módulo Equivalente calculado para o FWD

Como é de esperar, a célula 1 tem valores bastante baixos, que não ultrapassem os 600 MPa. No caso da célula 2, os módulos dados pelo DIP encontram-se sempre acima dos módulos equivalentes calculados para o ensaio do FWD, à excepção do ponto à distância 3,55 m que, por estar colocado sobre extensómetros colocados em profundidade, têm valores diferente. As células 3 e 4 são as que mais se aproximam das duas comparações feitas.

Como segunda comparação (ver Figura 3.34), tem-se o módulo dado pelo DIP e o módulo da primeira camada retroanalizado pelo programa de cálculo BISAR para o ensaio do FWD.

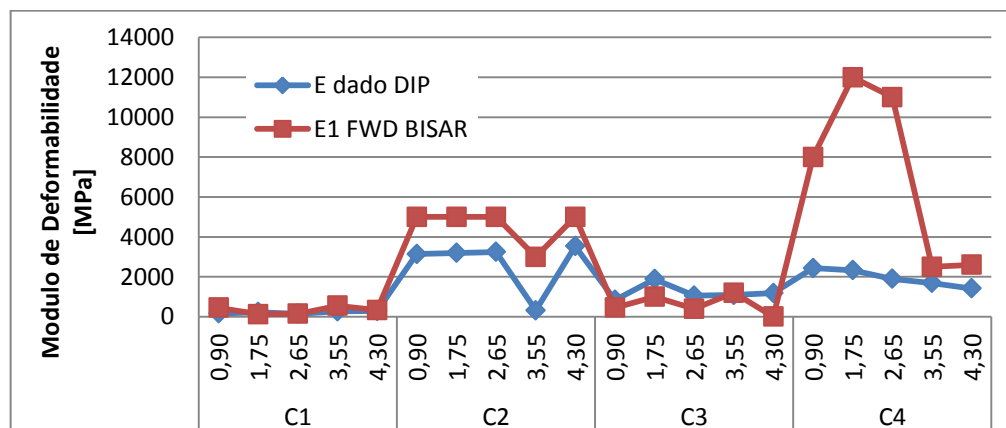


Figura 3.34 Módulo dado pelo DIP vs o Módulo estimado pelo BISAR calculado para o FWD

Como está exposto na Figura 3.34, na célula 1 a diferença entre os dois valores é mais baixa. Na célula 2, nota-se uma coerência entre os dois valores, sendo essa diferença, quase sempre, a mesma. Na célula 3, os valores oscilam pouco entre eles, sendo bastante próximos. Na célula 4 os módulos de deformabilidade estimados pelo BISAR chegam a ser cinco vezes maiores que os módulos dados pelo DIP, só nos dois últimos pontos de ensaio, 3,55 e 4,30 m, é que estes dois módulos se aproximam.

Como terceira comparação, exemplificado na Figura 3.35, abaixo, tem-se o módulo de deformabilidade equivalente do FWD, com o módulo da primeira camada retroanalizado para o FWD.

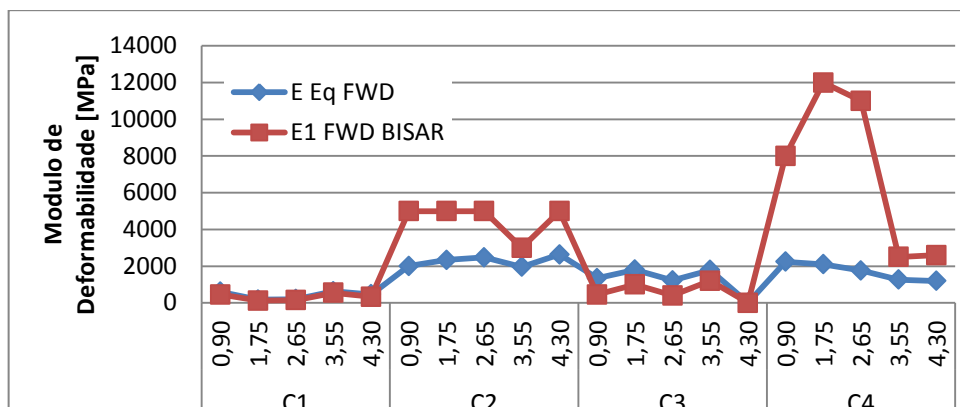


Figura 3.35 Módulo Equivalente calculado para o ensaio FWD vs o Módulo estimado pelo BISAR

Constata-se que também, neste caso, a célula 1 e 3 têm diferenças mais pequenas entre estes módulos.

### 3.6.3 Avaliação dos erros

De uma forma mais sucinta, calcularam-se os erros obtidos para as diversas comparações acima apresentadas.

Este cálculo serve de verificação para saber se as comparações apresentadas são apropriadas e possíveis de fazer.

Têm-se, no Quadro 3.13, abaixo, os erros obtidos para as várias comparações feitas entre os módulos já apresentados no Quadro 3.12. Os erros foram calculados com base na equação (3.1).

Quadro 3.13 Erros em % dados em função dos módulos equivalentes

Força	Célula	Distância (m)	Erro E dado DIP vs E Eq DIP	Erro E dado DIP vs E DIP BISAR	Erro E Eq. FWD vs E1 FWD BISAR	Erro E dado DIP vs E Eq. FWD	Erro E dado DIP vs E1 FWD BISAR
25 kN	C1	0,90	6,42	8,05	25,80	278,32	180,72
		1,75	6,39	8,43	29,37	23,58	46,03
		2,65	6,42	7,22	27,78	36,76	1,23
		3,55	6,42	7,08	12,93	137,93	107,16
		4,30	6,40	6,55	28,20	60,54	15,26
	C2	0,90	0,00	2,96	148,71	35,91	59,40
		1,75	0,02	1,05	113,90	26,86	56,45
		2,65	0,01	0,41	102,14	23,72	54,19
		3,55	0,01	1,19	53,06	523,20	853,90
		4,30	0,01	5,20	89,71	25,48	41,37
	C3	0,90	0,01	0,85	66,44	59,90	46,33
		1,75	0,01	2,59	44,68	3,87	46,82
		2,65	0,01	0,97	67,20	16,01	61,95
		3,55	0,01	0,32	32,80	64,58	10,59
		4,30	0,00	0,07	-	-	-
	C4	0,90	0,01	1,18	257,10	7,96	228,69
		1,75	0,02	1,70	471,12	9,73	415,53
		2,65	0,01	1,49	524,66	7,05	480,60
		3,55	0,00	1,19	97,44	24,91	48,26
		4,30	0,00	0,23	117,95	15,59	83,97

No caso, da comparação entre E dado DIP e o E Eq. DIP, como é apresentado no quadro acima, os erros obtidos são geralmente insignificantes. No entanto, pode-se observar que a célula 1, é a que tem uma percentagem maior de erros. Isto deve-se ao facto de se tratar de um material granular, que como já foi visto, é mais propício a erros de medições. Mas é importante reparar que estes erros nunca ultrapassam 10%.

A Figura 3.36 apresenta os erros obtidos no caso das comparações do módulo dado pelo DIP com os dois módulos correspondente ao FWD, como também, pelas comparações entre estes últimos, o *E Eq. FWD* e o *E1 FWD BISAR*.

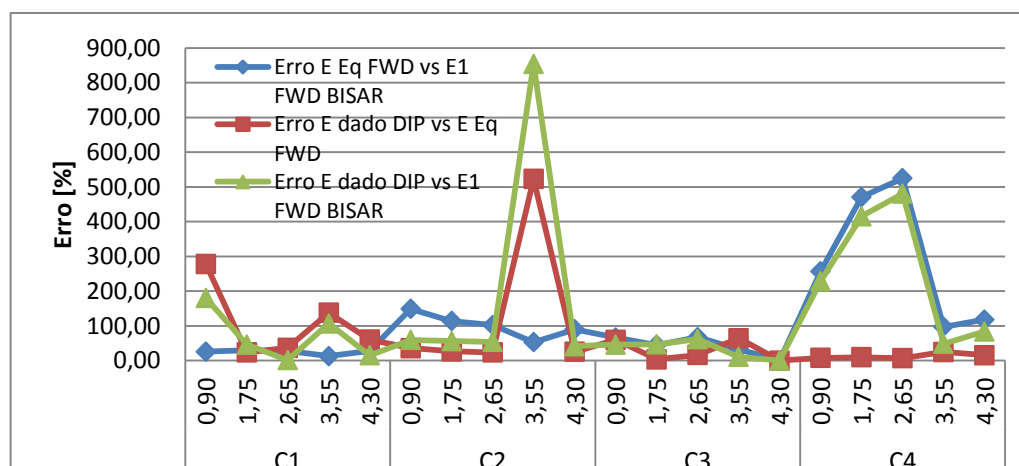


Figura 3.36 Erros obtidos para as comparações feitas para o ensaio do FWD

Neste caso, observam-se discrepâncias significativas entre os módulos comparados, com destaque para a localização 3,55 m da célula 2, e para a célula 4, como já observado anteriormente. No entanto, na generalidade, os erros são abaixo de 50%.

### 3.7 Estudo de factores de influência na retroanálise

#### 3.7.1 Efeito da normalização

Por vezes não é possível recorrer-se ao equipamento desejado para efectuar uma boa avaliação de pavimento, por isso, vai ser estudado o efeito da normalização para diferenças significativas de forças. Isto é, verificar-se-á se, de algum modo, o Deflectómetro de Impacto (FWD) pode ser substituído ou equiparável ao Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP), ou vice-versa.

Para tal, para esta análise, realiza-se uma conversão das deflexões obtidas para uma dada força de ensaio para uma outra força desejada através da normalização.

Como foi anteriormente explicado, a normalização é feita como uma espécie de equivalência. Neste caso, a discrepância entre as duas forças é bastante superior a 1 kN.

Uma vez que o DIP apenas mediu as deflexões para uma força de 15 kN, estas medições serão normalizadas para 25, 50, 75, 90 e 120 kN (forças utilizadas para o FWD) e estudadas em comparação às medições feitas pelo FWD, a essas mesmas forças.

Como o FWD consegue ter alturas de quedas tão diferentes, este estudo também será feito ao contrário. Pegando em cada medição feita a uma determinada força, normaliza-la para as outras forças existentes.

Assim pretende-se estudar a influência da normalização das forças, por exemplo, se os ensaios são realizados a uma força de 25 kN, qual será o erro quando normalizados para uma forma equivalente a 120 kN.

Como tal, foram normalizados os resultados dos ensaios realizados pelo FWD para 25 kN, para as outras forças aplicadas (50, 75, 90 e 120 kN). O mesmo procedimento foi realizado para os ensaios realizados para 75 kN.

A força de 25 kN foi escolhida, uma vez que se pretende comparar os ensaios feitos pelo FWD e o DIP.

Por outro lado, a normalização feita a partir de 75 kN foi escolhida, uma vez que este valor se aproxima dos valores usualmente praticados nos pavimentos de autoestradas, onde o ensaio é geralmente feito para uma força de 65 kN.

**Quadro 3.14 Normalização das deflexões D1 ( $\mu\text{m}$ ) medidas para 25 e 75 kN para as várias forças**

G.	C.	Dist. (m)	Deflexões Originais, não normalizadas					Normalizadas a partir dos 25 kN				Normalizadas a partir dos 75 kN			
			25	50	75	90	120	50	75	90	120	25	50	90	120
D1	C1	0,90	153	268	355	389	487	306	459	551	735	118	237	426	568
		1,75	521	806	862	855	914	1042	1563	1876	2501	287	575	1034	1379
		2,65	460	563	589	600	562	920	1380	1656	2208	196	393	707	943
		3,55	146	243	343	384	527	291	437	524	698	114	229	411	548
	C2	0,90	48	101	137	176	239	95	143	172	229	46	91	164	219
		1,75	38	80	123	154	223	76	114	137	182	41	82	148	197
		2,65	38	77	112	149	207	76	114	137	182	37	75	135	180
		3,55	45	99	127	164	246	91	136	163	217	42	85	152	203
	C3	0,90	71	137	195	246	338	141	212	254	338	65	130	234	312
		1,75	52	111	168	209	308	103	155	186	247	56	112	202	269
		2,65	76	159	243	327	490	152	229	274	366	81	162	291	388
		3,55	52	104	160	197	293	104	156	187	250	53	106	192	256
	C4	0,90	42	85	137	177	252	85	127	152	203	46	91	165	219
		1,75	45	93	148	188	261	89	134	160	214	49	99	178	237
		2,65	54	112	177	229	339	107	161	193	257	59	118	213	283
		3,55	75	152	232	297	448	150	225	269	359	77	155	279	372

Apresenta-se na Figura 3.37, um exemplo das deflexões normalizadas a partir dos valores das deflexões medidas em ensaio com aplicação de 25 kN. Como é de esperar, uma vez que a normalização parte da mesma bacia de deflexão, as deflexões obtidas através de várias normalizações são todas paralelas entre si.

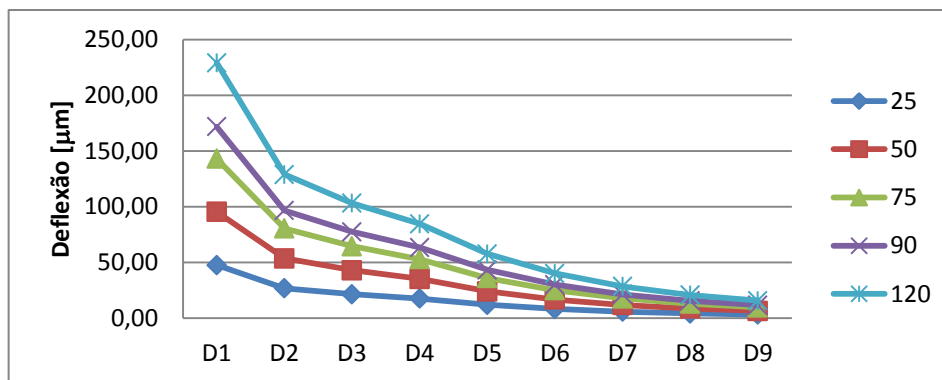


Figura 3.37 Normalização da força de 25 kN para a célula 2

Os resultados obtidos para a normalização a partir de 75 kN são apresentados em anexo.

Para melhor análise dos resultados, foram calculados os erros entre a deflexão original e as deflexões normalizadas, de modo a ser selecionada a mais próxima da original. Para este tipo de análise, apenas interessam as medições obtidas para D1, D2 e, eventualmente, D3, uma vez que estas apresentam valores de deflexão superiores.

Detectou-se uma anomalia em alguns valores medidos à distância 4,30 m, e, por isso, foram retirados da análise de modo a evitar erros de interpretação e análises adulteradas.

Retiram-se, a partir do Quadro 3.15, os erros, calculados a partir da equação (3.1) para o cálculo do RMS, associados a estas normalizações.



Quadro 3.15 Erros, em %, das normalizações feitas para D1

			Erro (%)							
Geofones	Célula	Distância (m)	Normalização a partir de 25kN				Normalização a partir de 75kN			
			50	75	90	120	25	50	90	120
D1	C1	0,90	2,0	8,6	17,3	25,8	5,1	1,3	0,9	2,8
		1,75	8,6	66,3	142,7	301,3	20,1	8,2	4,4	25,8
		2,65	40,4	180,3	310,8	858,3	32,8	9,1	3,2	45,9
		3,55	3,8	7,5	13,3	10,6	4,6	0,4	0,5	0,2
	C2	0,90	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	1,0	0,5	0,7
		1,75	0,3	0,6	1,3	3,4	0,7	0,0	0,2	1,4
		2,65	0,0	0,0	0,7	1,4	0,0	0,1	0,9	1,7
		3,55	0,6	0,5	0,0	1,3	0,5	2,0	0,5	3,0
	C3	0,90	0,1	0,7	0,1	0,0	0,6	0,3	0,3	0,6
		1,75	0,5	0,7	1,3	3,9	0,8	0,0	0,1	1,6
		2,65	0,2	0,3	2,6	6,4	0,4	0,0	1,2	4,3
		3,55	0,0	0,0	0,2	2,1	0,1	0,1	0,1	1,6
	C4	0,90	0,0	0,6	2,0	3,7	0,7	0,6	0,5	1,6
		1,75	0,2	1,0	2,1	3,3	1,2	0,4	0,3	0,8
		2,65	0,2	0,9	2,5	5,8	1,1	0,3	0,5	2,7
		3,55	0,0	0,1	0,9	3,9	0,1	0,0	0,4	2,9

Como se pode observar nos valores apresentados no Quadro 3.15, qualquer normalização se aproxima bastante das forças originais, excepto para a célula 1, onde se observam erros bastante significativos. Como tal, no caso com misturas betuminosas, este método de normalização pode ser utilizado para futuros estudos com o FWD.

Para saber qual a aproximação melhor com as forças originais, no Quadro 3.16, com base no cálculo do RMS, escolheu-se o erro inferior, sendo este o que melhor se aproxima das deflexões originais.

Quadro 3.16 Cálculo do RMS das Normalizações de D1

		RMS (%)									
Geofone	Célula	Normalização a partir de 25 kN					Normalização a partir de 75 kN				
		50	75	90	120	aprox. válida	25	50	90	120	aprox. válida
D1	C1	14,30	29,31	41,58	50,84	50	22,66	11,61	9,49	16,65	90
	C2	5,77	4,75	2,31	4,22	90	4,53	10,04	6,74	8,56	25
	C3	3,01	8,64	3,02	0,01	120	7,96	5,19	5,18	7,94	90
	C4	0,54	7,51	14,22	19,33	50	8,11	7,53	7,26	12,78	90

Repare-se que, as deflexões medidas para a força original que mais se aproximam das deflexões normalizadas a partir de 25 kN, são as correspondentes aos 50 kN. No caso das normalizações a partir das 75 kN as deflexões que se aproximam mais das originais, são as de 90 kN.

Como é compreensível no gráfico a baixo, da Figura 3.38, ambas as curvas, a normalizada de 25 para 50 kN e a de 50 kN original, ajustam-se uma à outra. A margem de erro existente é mínima.

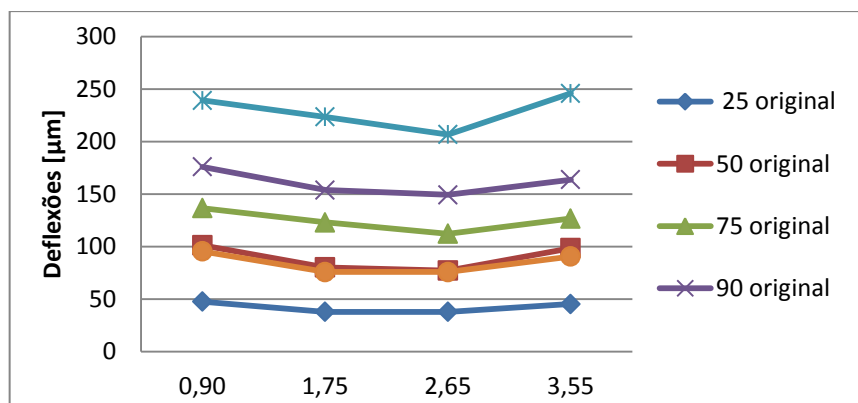


Figura 3.38 Normalização D1 de 25 para 50 kN para a célula 2

Comparando agora, a diferença entre a força original e a de normalização, pode-se analisar as margens de erros correspondentes. Isto é, a diferença que vai da força 25 para a de 50 kN é de 25 kN, mas a diferença que vai da força de 25 para 75 kN já é de 50 kN.

Tendo em conta isto, e ordenando de uma forma perceptível, conforme a diferença entre a força original e a normalizada, apresenta-se o Quadro 3.17, com o valor mínimo das médias os respectivos erros da normalização.

Quadro 3.17 Médias dos Erros (%) de normalização do D1 ordenadas pela diferença das forças

Célula	Normalizado de 25 kN				Normalizado de 75 kN				Ordenado					
	25	50	65	95	50	25	15	45	15	25	45	50	65	95
C1	14,3	29,3	41,6	50,8	22,7	11,6	9,5	16,7	9,5	14,3	16,7	29,3	41,6	50,8
C2	5,8	4,7	2,3	4,2	4,5	10,0	6,7	8,6	6,7	10,0	8,6	4,7	2,3	4,2
C3	3,0	8,6	3,0	0,0	8,0	5,2	5,2	7,9	5,2	5,2	7,9	8,6	3,0	0,0
C4	0,5	7,5	14,2	19,3	8,1	7,5	7,3	12,8	7,3	7,5	12,8	8,1	14,2	19,3

Analisando de uma forma mais geral, pode-se observar a discrepância de valores presentes nas diferentes estruturas. A célula 1, vai tendo mais erros conforme maior for a diferença de forças. Tanto a célula 2 como a 3, os erros associados a esta comparação não

chegam a ultrapassar os 10%. Na célula 4 para as diferenças maiores, os erros tendem a subir ligeiramente, nunca ultrapassando os 20%.

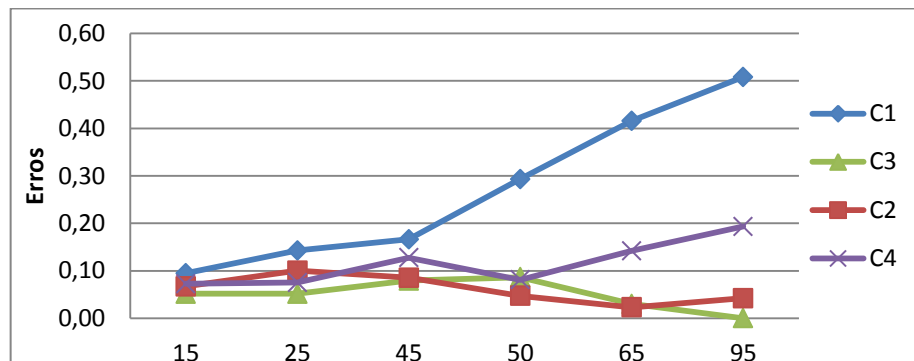


Figura 3.39 Erros da normalização de D1 obtidos nas diferentes células

Comparando agora as diferenças comuns, isto é, como se pode observar, temos dois intervalos de forças em comum para as duas forças. Quando se normaliza a força de 25 para 50 kN e de 75 para 50 kN, temos uma diferença de 25 kN e no caso da normalização da força de 25 para 75 kN e de 75 para 25 kN, existe um intervalo de 50 kN. Equiparando-as, observa-se que a célula 1 é a que tem maiores erros associados.

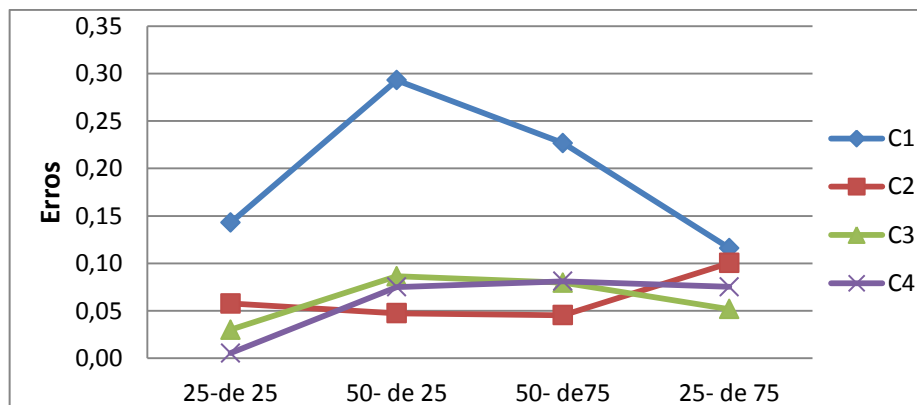


Figura 3.40 Erros da normalização de D1 para os mesmos intervalos de valores (25 e 50 kN)

Uma vez que as medições D1 têm bastante influência da placa, foram estudadas, igualmente, as medições D2 que não sofrem este tipo de influência. Por isso, todo o estudo feito anteriormente para a medição D1, será feita para D2.

Os resultados obtidos, referentes a D2 são apresentados em anexo. Foi observado que tanto a normalização a partir do 25 kN como a partir do 75 kN têm o ajuste semelhante ao D1. Ordenando apenas pela diferença das forças existentes, observa-se uma ligeira redução dos erros.

Na Figura 3.41, apresenta-se para as deflexões D2, os mínimos das médias dos erros entre as diferenças entre a força original e a normalizada, ordenados pela grandeza da diferença.

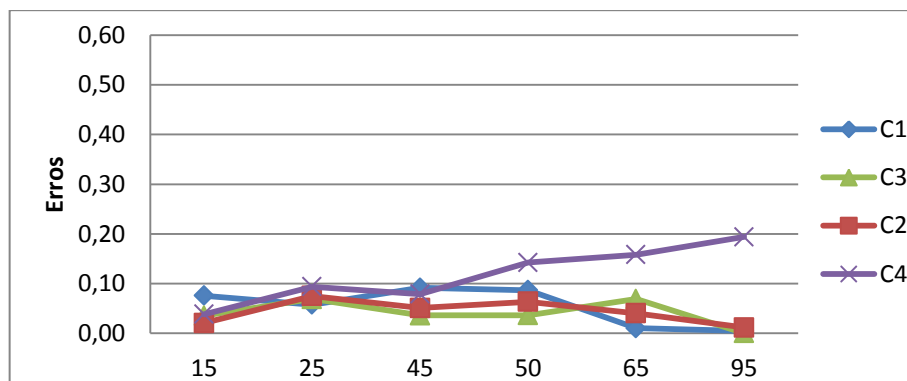


Figura 3.41 Erros da normalização de D2 obtidos nas diferentes células

Comparando o gráfico da figura anterior com o apresentado para as deflexões D1, Figura 3.39, observa-se que os erros rondam os mesmos valores. Apenas a célula 1, com o aumento das diferenças, tem uma melhora substancial dos erros associados.

A célula 1, como tem material granular, sofre maior influência da placa e é a que diverge mais na comparação dos erros de normalização do D1 com o D2. Observe-se também que estes erros obtidos para a medição D2 não chegam geralmente a 10%, exceto a célula 4 que não chega a 20%, o que é um valor bastante aceitável.

As mesmas observações feitas para o gráfico acima, podem também ser aplicadas para a próxima comparação relativa às diferenças comuns, de 25 e 50 kN, das duas normalizações para D2, apresentadas na Figura 3.42, quando comparando com a Figura 3.40.

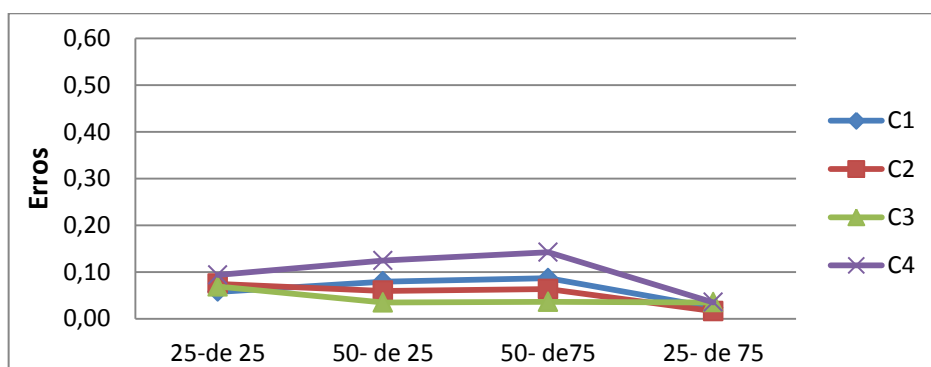


Figura 3.42 Erros da normalização de D2 para os mesmos intervalos de valores (25 e 50 kN)

O mesmo raciocínio foi aplicado para os ensaios feitos pelo DIP, chegou-se à conclusão que os erros aumentam bastante com a diferença entre a força original, 15 kN, e às forças normalizadas.

Através do Quadro 3.18, repara-se que a força que mais se ajusta, em todos os casos, à curva original, é a normalizada para 25 kN.

**Quadro 3.18 Cálculo do RMS da Normalização do DIP**

G.	Cél.	Distância (m)	Orig.	Normalizado de 15 kN					RMS (%)				
			15	25	50	75	90	120	25	50	75	90	120
D1	C1	0,90	372	621	1241	1862	2234	2979	81,6	152,8	200,0	223,6	264,6
		1,75	258	429	859	1288	1546	2061					
		2,65	407	678	1356	2033	2440	3253					
		3,55	225	375	749	1124	1349	1799					
		4,30	208	347	695	1042	1251	1668					
	C2	0,90	18	30	59	89	107	142	81,6	152,8	200,0	223,6	264,6
		1,75	17	29	58	87	105	140					
		2,65	17	29	57	86	103	138					
		3,55	178	296	592	888	1066	1421					
		4,30	16	26	53	79	95	126					
	C3	0,90	67	111	222	333	400	533	81,6	152,8	200,0	223,6	264,6
		1,75	30	50	99	149	178	238					
		2,65	53	89	177	266	319	425					
		3,55	51	86	172	257	309	412					
		4,30	47	79	158	236	284	378					
	C4	0,90	23	38	77	115	138	184	81,6	152,8	200,0	223,6	264,6
		1,75	24	40	80	120	144	192					
		2,65	29	49	98	147	177	236					
		3,55	33	55	110	166	199	265					
		4,30	40	66	132	198	237	316					

Conclui-se que não devem ser feitas estas normalizações para grandes diferenças entre a força original como a normalizada, especialmente no caso de materiais granulares.

### 3.7.2 Influência do erro de medição

Sabendo que as medições feitas pelos geofones têm um erro de aproximadamente 5%, foi feita uma análise da gama dos valores correspondentes. No Quadro 3.19, estão as margens obtidas, com o erro de 5%, para a medição feita em cada ponto.

Quadro 3.19 Gama de valores obtidos tendo em conta uma margem de erro de 5%

Força	Célula	Distância (m)	DIP 15 kN			FWD 25 kN			FWD 120 kN		
			DIP_15 D1 ( $\mu\text{m}$ )	GAMA		FWD_25 D1 ( $\mu\text{m}$ )	GAMA		FWD_120 D1 ( $\mu\text{m}$ )	GAMA	
				mín.	máx.		mín.	máx.		mín.	máx.
25 kN	C1	0,90	372	354	391	154	146	161	510	484	535
		1,75	258	245	271	526	500	552	894	849	939
		2,65	407	386	427	464	441	487	553	526	581
		3,55	225	214	236	147	140	155	537	510	564
		4,30	208	198	219	203	192	213	2222	2111	2333
	C2	0,90	18	17	19	46	44	49	281	267	295
		1,75	17	17	18	40	38	42	246	234	259
		2,65	17	16	18	38	36	40	229	218	241
		3,55	178	169	186	48	45	50	296	281	311
		4,30	16	15	17	35	34	37	222	211	234
	C3	0,90	67	63	70	69	66	73	346	328	363
		1,75	30	28	31	52	49	54	315	299	330
		2,65	53	50	56	76	73	80	499	474	524
		3,55	51	49	54	52	50	55	286	272	300
		4,30	47	45	50	-	-	-	306	291	321
	C4	0,90	23	22	24	42	39	44	251	239	264
		1,75	24	23	25	44	42	47	263	250	276
		2,65	29	28	31	53	50	56	341	324	358
		3,55	33	31	35	74	70	77	446	424	468
		4,30	40	38	42	78	74	82	342	325	359

Tendo em conta isso, e o fato de a deflexão máxima medida por geofones é de 2000  $\mu\text{m}$ , recomenda-se a aplicação de forças de carga/equipamentos de acordo com a rigidez da estrutura a ensaiar. Assim, para estruturas mais fracas pode-se aplicar o DIP e o FWD com forças de carga baixas enquanto que para estruturas mais rígidas, deve-se aplicar o FWD com forças de carga altas.

### 3.8 Considerações finais

Procedeu-se a um estudo realizado com quatro células de exemplo base. As quatro células eram constituídas pelo solo de fundação, camada de base e camada de desgaste, as primeiras duas com o mesmo tipo de material, tendo apenas espessuras diferentes de cada camada para cada tipo de célula. A camada de desgaste era diferente da célula 1 para o resto das células, na primeira, encontra-se uma camada de 0,30 m de material granular, nas

restantes três células, a camada de desgaste é constituída por misturas betuminosas, com espessuras diferentes.

Com os equipamentos escolhidos, FWD e DIP, procedeu-se a realização de ensaios de medição das deflexões para cada célula em vários pontos. Para o FWD foi possível medir nove deflexões, em cada ponto, enquanto que para o DIP, apenas foi possível medir a deflexão centrar. Com o DIP foram realizadas duas campanhas de medição em cada célula, a temperaturas diferentes, de 17 e 25°C, respetivamente.

Atraves da retroanálise das deflexões medidas no ensaio pelo FWD, conseguiu-se obter uma boa aproximação entre as deflexões medidas em campo e as calculadas. Isto é a deformada calculada, pelo programa de cálculo BISAR, aproxima-se de forma satisfatória da deformada real. Durante o processo de retroanálise teve-se em consideração que a deflexão registada no sensor D1 é o reflexo do conjunto da estrutura total (pavimento e fundação), enquanto que, a deflexão registada no sensor D9, traduz na sua essência a resposta da fundação à carga aplicada.

No caso da existência de camadas desligadas, concluiu-se que, avaliando erradamente as condições em que se encontra um pavimento, pode induzir em erro a estimativa dos módulos de deformabilidade das diversas camadas, como a estimativa do período de vida útil, que será visto no próximo capítulo.

No caso do DIP, a aproximação das deflexões medidas pelo equipamento com as deflexões retroanalizadas pelo BISAR, foi mais fácil de realizar, uma vez que o DIP apenas mede uma deflexão, no centro da placa, por ponto.

No caso dos ensaios realizados com o DIP, da análise feita à influência da temperatura nos diferentes materiais utilizados, conclui-se que, para as misturas betuminosas, os módulos de deformabilidade dados pelo DIP à temperatura em campo, e os módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de projecto (20°C), encontram-se bastante próximos.

Através do cálculo do módulo de deformabilidade equivalente, calculado para os ensaios realizados pelo FWD e o DIP, foi possível estabelecer uma relação entre os módulos de deformabilidade dados por esses dois equipamentos, FWD e DIP, e entre os módulos de deformabilidade retroanalizados pelo BISAR.

De seguida, com o estudo do efeito da normalização de forças, foi possível concluir que não dever ser aplicada esta normalização de forças, a grandes diferenças entre a força original e a força normalizada, e especialmente, no caso de materiais granulares.

Neste estudo foram apresentados vários casos práticos que permitam uma avaliação global e comparação em termos de resultados. Deste modo, é possível uma orientação e aconselhamento cuidado para futuros estudos a realizar nesta área.

No capítulo seguinte, serão estimados os períodos de vida úteis para diferentes combinações de infraestruturas, e analisados os resultados.

Por fim, será feito um estudo paramétrico com as devidas soluções económicas



## **4 Análise Estrutural**

### **4.1 Apresentação geral**

Nesse Capítulo, com base nos resultados obtidos através da retroanálise, será realizada a análise estrutural dos quatro tipos de pavimento estudados em modelo físico. Assim, será avaliada a vida útil dos pavimentos para uma carga equivalente ao eixo padrão de 130 kN. Os critérios de ruína considerados são os normalmente aplicados para pavimentos flexíveis, nomeadamente o de fadiga e o de deformação permanente.

Será também analisada, no caso da Célula 3, a influência da consideração da ligação entre camadas como total ou parcial, como já referido na retroanálise e as respetivas consequências para a vida útil do pavimento.

De seguida será feito um estudo do efeito da consideração da espessura de camada granular na vida útil de um pavimento. Assim, é realizado um estudo paramétrico de dimensionamento de um pavimento novo considerando para estimativa do módulo das camadas granulares a espessura conjunta das mesmas ou as espessuras separadas de camadas granulares individuais de 15 e 20 cm respetivamente.

Apresenta-se também um outro estudo de dimensionamento de pavimentos novos, para várias condições de fundação, tentando-se obter estruturas com capacidade de carga equivalente a da Célula 2, através do aumento da espessura da camada de misturas betuminosas. Comparar-se-ão os novos pavimentos estudados com os do nosso caso de estudo e será, por fim, feita uma consideração económica das diferentes soluções apresentadas.

### **4.2 Avaliação da capacidade de carga dos casos de estudo**

#### **4.2.1 Correção para a temperatura de projeto**

Como já referido, e aplicando a equação (4.2), foi corrigido o módulo de deformabilidade das camadas de misturas betuminosas,  $E_1$ , para a temperatura de projeto, considerada no âmbito deste estudo de 20°C. Refere-se que as medições com o FWD e DIP (na primeira campanha) foram realizadas com temperaturas no pavimento de 17°C.

Como exemplo deste cálculo, tem-se os ensaios realizados pelo FWD, para 25 kN, no Quadro 4.1, com os vários módulos retroanalizados e corrigidos para a temperatura de projeto de 20°C, para as células 2, 3 e 4. Note-se que a célula 1, por ser em material granular não é influenciada pela temperatura.

**Quadro 4.1 Módulo de Deformabilidade E1 (MPa) corrigido para a temperatura de projeto de 20°C**

Força	Célula	Distância (m)	E1 Retroanalísado (MPa)	E1 Corrigido (MPa)
25 kN	C2	0,90	5000	4562
		1,75	5000	4562
		2,65	5000	4562
		3,55	3000	2737
		4,30	5000	4562
	C3	0,90	450	411
		1,75	1000	912
		2,65	400	365
		3,55	1200	1095
		4,30	8000	7299
	C4	0,90	8000	7299
		1,75	12000	10948
		2,65	11000	10036
		3,55	2500	2281
		4,30	2600	2372

Os restantes casos, para forças de ensaio superiores a 25kN estão apresentados em anexo.

Como se pode observar, em todos os quadros, o módulo de deformabilidade corrigido de 17 para 20°C, são inferiores aos módulos de deformabilidade retroanalísados pelos equipamentos.

É então, com base nos novos módulos de deformabilidade, corrigidos para a temperatura de projeto, que vai ser realizado o próximo estudo, nomeadamente a avaliação da vida útil dos pavimentos.

#### 4.2.2 Ação do tráfego

Este sub-capítulo remete para uma avaliação de longo prazo das diferentes estruturas, as estudadas no caso de estudo e outras novas, que servirão de comparação. Assim, serão calculados os períodos de vida útil para cada estrutura.

Este estudo utiliza o mesmo programa de cálculo, BISAR. É com este programa que serão calculadas as extensões que ocorrem nos pavimentos devido a carga do eixo padrão de 130 kN. Com base nessas extensões, calcula-se o período de vida útil de cada estrutura, tendo em consideração os critérios de ruína associados.

Foi optado por simular uma passagem de rodados do eixo padrão de 130 kN para todos os modelos estruturais obtidos no capítulo anterior, tanto para os ensaios com o FWD como para os com o DIP.

A Figura 4.1. apresenta o modelo de carregamento aplicado no BISAR, nomeadamente do eixo padrão de 130 kN. As características assumidas para modelação para o eixo padrão de 130 kN são as seguintes: uma força por roda de 32,5 kN, considerada uniformemente distribuída sobre uma impressão circular com o raio de 12,5 cm, resultando numa pressão equivalente aplicada por roda de 662 kPa, e tendo uma distância entre rodas de 37,5 cm.

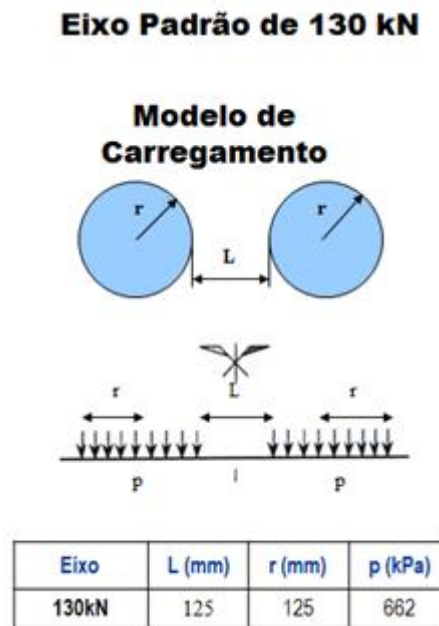


Figura 4.1 Modelo de carregamento para um eixo padrão de 130 kN

### 4.2.3 Cálculo das extensões

Ao colocar a carga do eixo padrão de 130 kN nos modelos estruturais, obtêm-se através do programa de cálculo linear elástico (Bisar), as extensões para os dois critérios de ruína considerados, fadiga e deformação permanente. Assim, é obtida a extensão a tração na base das camadas em misturas betuminosa, segundo as duas direções horizontais XX e YY, para o critério de ruína por fadiga, e a extensão a compressão para o topo da camada de solo de fundação, segundo a direção ZZ, para o critério de deformação permanente.

Sendo XX e YY eixos perpendiculares, e visto que a incidência da roda têm uma distribuição radial, opta-se pela maior das extensões obtidas, entre estes dois valores, para o cálculo do critério de ruína por “fadiga” (Nt).

Os valores ZZ, aparecem em negativo, correspondendo a uma extensão a compressão no topo da camada de solo de fundação. Esta medição servirá para o cálculo do critério de ruína por “deformação permanente” (Nc).

No Quadro 4.2 encontram-se os valores das extensões obtidas para a célula 2, sob a carga com o eixo padrão de 130 kN, utilizando os modelos estruturais estabelecidos para ensaios com o FWD a 25 kN. Os valores máximos para cada um dos critérios, em cada ponto de ensaio, estão assinalados a negrito.

**Quadro 4.2 Extensões ( $\epsilon$ ) obtidas para o eixo padrão de 130 kN na célula 2**

Célula	Distância (m)	Coordenadas			$\epsilon_t$ max XX / YY ( $\mu\text{m}$ )	$\epsilon_c$ ZZ ( $\mu\text{m}$ )
		x	y	z		
C2	0,90	0,00	0,00	0,11	<b>34,93</b>	-
		0,00	0,00	0,41	-	-103,6
		0,00	0,1875	0,11	24,01	-
		0,00	0,1875	0,41	-	<b>-110,7</b>
	1,75	0,00	0,00	0,11	<b>11,6</b>	-
		0,00	0,00	0,41	-	-79,18
		0,00	0,1875	0,11	4,618	-
		0,00	0,1875	0,41	-	<b>-83,97</b>
	2,65	0,00	0,00	0,11	<b>11,6</b>	-
		0,00	0,00	0,41	-	-79,18
		0,00	0,1875	0,11	4,618	-
		0,00	0,1875	0,41	-	<b>-83,97</b>
	3,55	0,00	0,00	0,11	<b>34,2</b>	-
		0,00	0,00	0,41	-	-84,95
		0,00	0,1875	0,11	21,29	-
		0,00	0,1875	0,41	-	<b>-90,42</b>
	4,30	0,00	0,00	0,11	<b>56,7</b>	-
		0,00	0,00	0,41	-	-77,51
		0,00	0,1875	0,11	43,52	-
		0,00	0,1875	0,41	-	<b>-83,62</b>

#### 4.2.4 Critério de ruína

Através da equação (4.1), calcula-se a extensão associada ao critério de ruína por fadiga ( $\varepsilon_t$ ), critério da SHELL [Fontul, 2004].

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N_t^{-0,2} \quad (4.1)$$

Sendo:  $V_b$  – percentagem volumétrica de betume (foi considerada de 9%);

$E$  – Módulo de Deformabilidade da camada de mistura betuminosa, corrigido para a temperatura de projeto (20°C) [MPa];

$N_t$  – Número admissível de passagens de eixo padrão, associado à fadiga.

Pela equação (4.2), calcula-se a extensão associada ao critério de ruína por deformação permanente ( $\varepsilon_c$ ), critério da SHELL (Fontul, 2004).

$$\varepsilon_c = 0,021 \times N_c^{-0,25} \quad (4.2)$$

Sendo:  $N_c$  – Número admissível de passagens de eixo padrão, associado à deformação permanente.

#### 4.2.5 Cálculo da vida útil

Das duas extensões obtidas pelos critérios de ruína, calcula-se o número admissível de passagens do eixo padrão  $N_{130}$  e a que tiver um número de passagens inferior considera-se como determinante, sendo esse o critério de ruína o mais gravoso. Tendo o  $N_{130}$ , calcula-se o período restante de vida útil ( $P_{dim}$ ), para cada ponto.

Tendo a expressão base do cálculo do  $P_{dim}$ , equação (4.3) (JAE, 1995).

$$N_{130} = 365 \times (TMDA)_p \times \frac{(1+t)^{P_{dim}} - 1}{P_{dim} \times t} \times \alpha \times P_{dim} \quad (4.3)$$

Sendo:  $N_{130}$  – o número acumulado de passagens do eixo padrão;

$(TMDA)_p$  – Tráfego Médio Diário Anual de Pesados (=12000 veículos);

$t$  – Taxa média de crescimento anual (= 4%);

$\alpha$  – Factor de Agressividade do tráfego (= 1).

O (TMDA)<sub>p</sub> considerado neste estudo foi escolhido para efeito de cálculo por forma a obter períodos de vida útil semelhantes a pavimentos flexíveis novos. Tendo em consideração que as estruturas estudadas têm uma vida útil muito acima do espetável para um pavimento flexível novo, o (TMDA)<sub>p</sub> considerado é também elevado.

E desenvolvendo a expressão, em ordem a  $P_{dim}$ , fica-se com a equação (4.4).

$$P_{dim} = \frac{\ln\left(\frac{1}{365} \times \frac{N_{130} \times t + 365 \times (TMDA)_p \times \alpha}{(TMDA)_p \times \alpha}\right)}{\ln(1 + t)} \quad (4.4)$$

Como exemplo, e de forma esclarecedora, será apresentado um quadro com o cálculo do período da vida útil para cada ponto da célula 2. Observa-se que o critério de ruína predominante é o de deformação permanente (dp), excepto para o ponto localizado a distância de 4,30 m, onde é mais limitativo o critério de fadiga (f).

Quadro 4.3 Cálculo do Período de vida útil para a célula 2 para 25 kN

Célula	Distância (m)	Critério de Ruína		$N_{130}$	Pdim (anos)
		$N_t$ (fadiga)	$N_c$ (def. permanente)		
C2	0,90	4,13E+09	<b>1,30E+09</b>	1,30E+09	65
	1,75	1,02E+12	<b>3,91E+09</b>	3,91E+09	92
	2,65	1,02E+12	<b>3,91E+09</b>	3,91E+09	92
	3,55	1,15E+10	<b>2,91E+09</b>	2,91E+09	85
	4,30	<b>3,67E+08</b>	3,98E+09	3,67E+08	37

De forma sucinta, apresenta-se no Quadro 4.4 os períodos de vida útil para as restantes células, com os devidos módulos de deformabilidade corrigidos pela temperatura. Para estes casos foram também utilizando os modelos estruturais obtidos através da retroanálise no caso dos ensaios com FWD para 25 kN.

Quadro 4.4 Resumo do cálculo dos períodos de vida útil

Célula	Distância (m)	E1 Corrigido - 20°C (MPa)	Pdim (anos)	Critério de ruína
C1	0,90	450	157	dp
	1,75	125	80	dp
	2,65	145	59	dp
	3,55	550	71	dp
	4,30	330	157	dp
C2	0,90	4562	65	dp
	1,75	4562	92	dp
	2,65	4562	92	dp
	3,55	2737	85	dp
	4,30	4562	37	f
C3	0,90	411	0	f
	1,75	912	2	f
	2,65	365	0	f
	3,55	1095	3	f
	4,30	7299	17	f
C4	0,90	7299	61	dp
	1,75	10948	47	f
	2,65	10036	26	f
	3,55	2281	5	f
	4,30	2372	9	f

Como se pode observar, o pavimento que se encontra em melhores condições, é o da célula 1, referente ao material granular. Como era de prever, o pavimento que se encontra em pior estado é o da célula 3, pois esta célula encontra-se com uma camada desligada.

A célula que se mantém, praticamente, homogénea continua a ser a célula 2, visto que, os valores dos períodos de vida úteis estimados, são da mesma ordem de grandeza.

De um modo geral, obtém-se os períodos da vida útil apresentados graficamente na Figura 4.2.

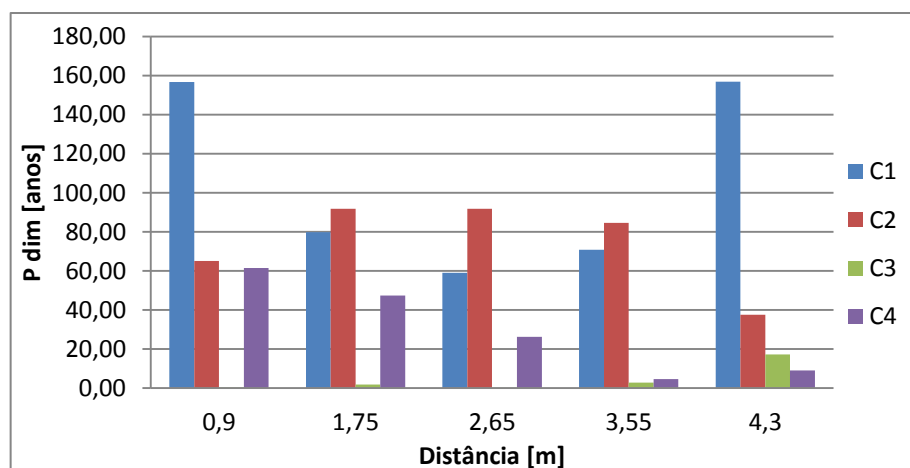


Figura 4.2 Período de vida útil para as células ensaiadas

#### 4.2.6 Consideração da camada parcialmente descolada

Estudando o caso particular da célula 3, compara-se o período de vida útil obtido considerando a camada ligada com o obtido considerando a camada parcialmente desligada. Deste modo, analisa-se o erro associado a esta comparação.

Analisando a célula 3 como estrutura com camadas perfeitamente ligadas, obtém-se, no Quadro 4.5, as extensões correspondentes aos mesmos critérios de ruína, nos pontos anteriormente estudados.

Repare-se que as extensões obtidas para a extensão a tração na base da camada de mistura betuminosa, nas direções XX e YY, são todas, à excepção do ponto à distância 4,30 m, negativas. Isto quer dizer que nesses pontos, a camada encontra-se em compressão. Consequentemente, o critério de ruína presente nesses pontos é apenas a deformação permanente.



Quadro 4.5 Extensões obtidas para o eixo padrão N<sub>130</sub> da célula 3, considerando a camada ligada

Força	Distância (m)	Coordenadas			$\epsilon_t$ max XX / YY ( $\mu$ m)	$\epsilon_c$ ZZ ( $\mu$ m)
		x	y	z		
25	0,90	0,00	0,00	0,05	-7,683	-45,09
		0,00	0,00	0,55		
		0,00	0,1875	0,05	<b>-12,78</b>	
		0,00	0,1875	0,55		
	1,75	0,00	0,00	0,05	-7,214	-43,4
		0,00	0,00	0,55		
		0,00	0,1875	0,05	<b>-12,04</b>	
		0,00	0,1875	0,55		
	2,65	0,00	0,00	0,05	-8,704	-55,73
		0,00	0,00	0,55		
		0,00	0,1875	0,05	<b>-15,82</b>	
		0,00	0,1875	0,55		
	3,55	0,00	0,00	0,05	-7,409	-58,24
		0,00	0,00	0,55		
		0,00	0,1875	0,05	<b>-15,25</b>	
		0,00	0,1875	0,55		
	4,30	0,00	0,00	0,05	<b>12,33</b>	-58,39
		0,00	0,00	0,55		
		0,00	0,1875	0,05	2,556	
		0,00	0,1875	0,55		

Calculando o período de vida útil para esta célula temos uma duração muito maior. Como se pode observar pelo Quadro 4.6, a vida útil deste pavimento seria superior a 120 anos.

Quadro 4.6 Cálculo do período de vida útil para a célula 3, considerando a camada ligada

Força	Distância (m)	Critério de ruína		N <sub>130</sub>	Pdim (anos)
		N <sub>t</sub> (fadiga)	N <sub>c</sub> (def. permanente)		
25	0,90		3,54E+10	3,54E+10	147
	1,75		4,13E+10	4,13E+10	151
	2,65		1,48E+10	1,48E+10	125
	3,55		1,23E+10	1,23E+10	121
	4,30	3,23E+11	1,21E+10	1,21E+10	120

Como foi visto anteriormente (ver 3.4.4), esta célula encontra-se com ligação deficiente entre camadas, e que por isso, a sua esperança média de vida é muito mais reduzida (ver Quadro 4.4), cerca de 2 anos.

É então, bastante importante identificar o estado em que se encontra cada estrutura de ponto de vista da ligação entre camadas, pois pode levar a uma avaliação errada sobre a sua vida útil restante.

Como se pode constatar, este erro de cálculo sobre o  $P_{dim}$ , repete-se para todas as forças usadas durante o ensaio com o FWD. Em alguns casos, a sobre estimativa do cálculo do período de vida útil, chega quase a atingir 200 anos.

**Quadro 4.7** Período de vida útil para a célula 3, considerando a camada ligada

Força	Distância (m)	E1 Corrigido – 20°C (MPa)	Pdim (anos)
25	0,90	237	147
	1,75	430	151
	2,65	260	125
	3,55	600	121
	4,30	8000	120
50	0,90	270	187
	1,75	400	151
	2,65	240	125
	3,55	590	121
	4,30	1300	110
75	0,90	260	179
	1,75	330	179
	2,65	200	146
	3,55	590	121
	4,30	500	146
90	0,90	240	179
	1,75	330	153
	2,65	180	138
	3,55	550	121
	4,30	400	146
120	0,90	220	179
	1,75	260	198
	2,65	150	138
	3,55	470	120
	4,30	310	146

Como se verifica, o erro associado a esta comparação, por norma, ronda os 100%. Só demonstra que a associação de camadas ligadas à célula 3, mais uma vez, é errada.

Quadro 4.8 Erro do  $P_{dim}$  da célula 3 considerando ligada e desligada

Célula	Distância (m)	$P_{dim\_Cam.}$ ligada (anos)	$P_{dim\_Cam.}$ desligada (anos)	Erro (%)
25	0,90	147	0	100
	1,75	151	2	99
	2,65	125	0	100
	3,55	121	3	98
	4,30	120	17	86
50	0,90	187	0	100
	1,75	151	1	99
	2,65	125	0	100
	3,55	121	3	98
	4,30	110	6	95
75	0,90	179	0	100
	1,75	179	1	99
	2,65	146	0	100
	3,55	121	2	98
	4,30	146	4	97
90	0,90	179	0	100
	1,75	153	1	99
	2,65	138	0	100
	3,55	121	2	98
	4,30	146	2	98
120	0,90	179	0	100
	1,75	198	0	100
	2,65	138	0	100
	3,55	120	1	99
	4,30	146	1	99

Tentando aproximar, ou até mesmo, ajustar os cálculos feitos para a altura de queda de 25 kN para as outras forças, calculou-se um  $P_{dim}$  médio para esta comparação. É através desses períodos de vida médios, que se comparam os períodos de vida obtidos para as outras forças. Isto é, se o valor médio para a célula 1 foi obtido para a distância de 1,75 m, será nesse ponto que a comparação será feita para as outras forças.

Repare-se que a célula 2 é a que tem a estimativa e erro menores, ou seja, é a célula 2 que tem uma aproximação mais coerente dos ensaios efectuados.

Quadro 4.9 Erros associados à comparação da força 25 kN com as outras

Força	Célula	Distância (m)	Pdim (anos)	Pdim médio	Erro-50 %	Erro-75 %	Erro-90 %	Erro-120 %	Erro mín %
25 kN	C1	0,9	157	80	93	76	124	144	76
		<b>1,75</b>	<b>80</b>						
		2,65	59						
		3,55	71						
		4,3	157						
	C2	0,9	65	85	47	4	7	12	4
		1,75	92						
		2,65	92						
		<b>3,55</b>	<b>85</b>						
		4,3	37						
	C3	0,9	0	2	40	40	49	77	40
		<b>1,75</b>	<b>2</b>						
		2,65	0						
		3,55	3						
		4,3	17						
	C4	0,9	61	26	35	70	64	86	35
		1,75	47						
		<b>2,65</b>	<b>26</b>						
		3,55	5						
		4,3	9						

### 4.3 Estudo Paramétrico

#### 4.3.1 Consideração gerais

Neste sub-capítulo, será realizado um ensaio paramétrico, que tem como objectivo, uma visão mais aprofundada sobre os vários tipos de estruturas existente e as devidas escolhas que se devem fazer para as melhorar.

Tendo como estrutura de referência o pavimento da célula 2 do caso de estudo, novas estruturas de pavimento foram estudadas.

Assim foram dimensionados pavimentos novos com o objetivo de estudar a capacidade de carga dos mesmos. O dimensionamento destes pavimentos novos foi feito com base no procedimento normalmente seguido neste processo [JAE, 1995].

Em primeiro lugar foi estudado o efeito da consideração, no âmbito do dimensionamento, das camadas granulares como um conjunto ou como camadas sobrepostas de espessura finita.

Em segundo lugar foram calculadas estruturas de pavimento novos, para vários valores do solo de fundação, tentando obter uma capacidade de carga equivalente a estrutura da célula 2, através do aumento da espessura das camadas em misturas betuminosas. Assim, é possível fazer uma apreciação da correspondência em termos de espessuras, entre as camadas de misturas betuminosas e as camadas de material granular, em função da qualidade deste último.

Mais uma vez, com o auxílio do programa de cálculo BISAR, foram analisadas estruturas de pavimentos flexíveis, sendo elaboradas recomendações dos métodos e materiais a utilizar em vários casos de aplicação.

De modo a compreender melhor o comportamento, e as características de cada material (composto) utilizado, materiais granulares e misturas betuminosas, foram executadas várias estruturas possíveis e avaliadas as suas durabilidades (período de vida útil).

#### **4.3.2 Dimensionamento de um pavimento novo**

Construindo um pavimento do “zero”, há que ter conta a qualidade dos materiais utilizados. A qualidade das misturas betuminosas, e também do material granular, visto que este é mais em conta.

As primeiras hipóteses, servem para arranjar uma solução menos dispendiosa. Isto é, uma vez que o material granular é bastante mais barato que as misturas betuminosas, tentar encontrar um equilíbrio entre estes dois materiais para assegurar a mesma durabilidade.

As estruturas estudadas são constituídas por uma camada de solo de fundação, camadas de sub-base em material granular, camadas de base em material granular ou misturas betuminosas e camada de desgaste em misturas betuminosas, como é esquematizado na Figura 4.3.

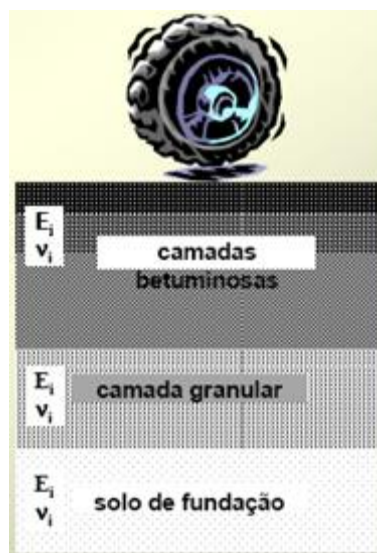


Figura 4.3 Estrutura do pavimento [Silva e Fontul, 2010]

Foi considerado, para o conjunto de camadas de base e sub-base em material granular como limite máximo, uma espessura não superior a 60 cm.

A seguir são apresentadas as diferentes estruturas dimensionadas, considerando no âmbito do dimensionamento das camadas granulares ou a espessura conjunta ou o dimensionamento por camadas de espessura finita. Assim, na Hipótese A, para o cálculo do módulo de deformabilidade desta camada com base no módulo do solo de fundação, foi considerada a espessura total do conjunto de camadas granulares, enquanto que nas Hipóteses B e C, o dimensionamento foi feito considerando o cálculo de módulos de deformabilidade de cada uma das camadas granulares de espessuras dadas, de 15 cm e 20 cm, respetivamente.

**Hipótese A:** O pavimento considera-se como sendo constituído, por:

- uma camada de mistura betuminosa (Mist. Bet.) com 11 cm de espessura ( $h_1$ ) e com um módulo de deformabilidade ( $E_1$ ) de 5000 MPa;
- uma camada de material granular (conjunta) com espessura variável ( $h_2$ ) e com um módulo de deformabilidade ( $E_2$ ) calculado consoante esta espessura e com base no módulo do solo de fundação ( $E_3$ ) utilizando as equações (2.5) e (2.6). Por fim, considera-se um solo de fundação com a espessura de 240 cm com um módulo de deformabilidade ( $E_3$ ) de 60 MPa.

**Quadro 4.10 Valores dos módulos das camadas e de espessuras para a hipótese A**

Mist. bet.	E1 (MPa)	<b>5000</b>				
Camada em mat.granular	E2 (MPa)	114	130	156	178	<b>197</b>
	h2 (cm)	150	200	300	400	<b>500</b>
Solo de fundação	E3 (MPa)	<b>60</b>				
	k	1,907	2,170	2,605	2,965	<b>3,278</b>

No caso da estrutura da Hipótese A obtém-se uma capacidade de carga (durabilidade) equivalente a estrutura da célula 2 do modelo físico, para uma espessura de camadas granulares de 500 cm (em vez dos 30 cm do modelo físico).

**Hipótese B:** O pavimento considera-se como sendo constituído, por:

- uma primeira camada de mistura betuminosa com 11 cm de espessura (h1) e com um módulo de deformabilidade (E1) de 5000 MPa;
- uma segunda camada de material granular que é dividida por “n” camadas de 15 em 15 cm e calculado um módulo E2 equivalente com as mesmas equações acima definidas;
- um solo de fundação de 240 cm (h3) com módulos de deformabilidade (E3) variável.

**Quadro 4.11 Valores dos módulos das camadas e de espessuras para a hipótese B**

Mist. Bet.	E1 (MPa)	5000			
Camadas em mat.granular (15 cm cada)	Nº camadas	4	3	2	1
	Total h2 (cm)	600	450	300	150
	E2 (MPa) média	385	476	604	793
Solo de fundação	E3 (MPa)	60	114	218	416
	k	1,907			

**Hipótese C:** O pavimento considera-se semelhante à hipótese anterior (B), mas em vez de camadas de 15 em 15 cm, são feitas camadas de 20 em 20 cm.

Quadro 4.12 Valores para a hipótese C

Mist. Bet.	E1 (MPa)	5000		
Camadas em mat. granular (20 cm cada)	Nº camadas	3	2	1
	Total h2 (cm)	600	400	200
	E2 (MPa) média	342	448	613
Solo de fundação	E3 (MPa)	60	130	283
	k	2,170		

Demonstradas as contas em cima, de uma forma mais sucinta, é representado um gráfico, na Figura 4.4, com as várias estimativas feitas, pelas 3 hipóteses, do módulo de deformabilidade obtido para a camada referente ao material granular, E2.

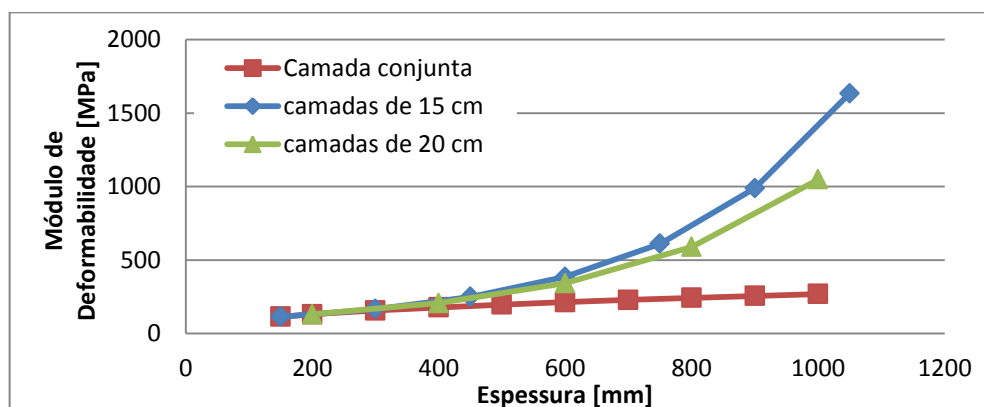


Figura 4.4 Estimativas para os módulos de deformabilidade das camadas de material granular2

Para determinar o período de vida útil, é então efetuada uma simulação de rodados para um eixo padrão de 130 kN, como foi feito anteriormente. Assim estuda-se como aumenta o período de dimensionamento com o aumento da espessura das camadas de material granular, quando consideramos as três hipóteses, nomeadamente considerando o módulo do conjunto das camadas ou o módulo de cada uma delas com espessuras de 15 cm e 20 cm respetivamente.

Para a primeira hipótese, hipótese A, obtêm-se os respetivos valores apresentados no Quadro 4.13.



Quadro 4.13 Períodos de vida útil para a hipótese A

	Espessura (mm)	E1 Corrigido (MPa)	Critério de ruína		N130	Pdim (anos)
			Nt (fadiga)	Nc (deformação)		
<b>Camada conjunta</b>	150	4562	4,20E+04	1,09E+05	4,20E+04	0,01
	200	4562	5,57E+04	1,58E+05	5,57E+04	0,01
	300	4562	9,33E+04	3,92E+05	9,33E+04	0,02
	400	4562	1,43E+05	1,05E+06	1,43E+05	0,03
	500	4562	1,99E+05	2,78E+06	1,99E+05	0,05

Para a hipótese B, considerando o E3 de 60 MPa, e acrescentando camadas em material granular com espessuras de 15 em 15 cm, os respectivos períodos de vida útil, são apresentados no quadro em baixo, Quadro 4.14.

Quadro 4.14 Períodos de vida útil para a hipótese B

	Espessura (mm)	E1 Corrigido (MPa)	Critério de ruína		N130	Pdim (anos)
			Nt (fadiga)	Nc (deformação)		
<b>Camadas de 15 cm</b>	150	4562	4,20E+04	1,09E+05	4,20E+04	0,0
	300	4562	1,40E+05	2,09E+06	1,40E+05	0,0
	450	4562	3,97E+05	5,52E+07	3,97E+05	0,1
	600	4562	1,21E+06	1,63E+09	1,21E+06	0,3

Por fim, no Quadro 4.15, encontra-se os cálculos e as estimativas feitas para a hipótese C, considerando o E3 de 60 MPa, e acrescentando camadas em material granular com espessuras de camadas de 20 em 20 cm.

Quadro 4.15 Períodos de vida útil para a hipótese C

	Espessura (mm)	E1 Corrigido (MPa)	Critério de ruína		N130	Pdim (anos)
			Nt (fadiga)	Nc (deformação)		
<b>Camadas de 20 cm</b>	200	4562	5,57E+04	1,58E+05	5,57E+04	0,0
	400	4562	2,36E+05	7,74E+06	2,36E+05	0,1
	600	4562	8,81E+05	4,91E+08	8,81E+05	0,2

Fazendo um apanhado das três hipóteses, pode-se observar que a camada granular dividida em camadas de 15 cm, apesar de quase irrelevante, é a que obtém períodos de vida úteis maiores.

Mas é no gráfico da Figura 4.5, que a diferença entre as várias estimativas do período de vida útil, das estruturas, se torna tao clara.

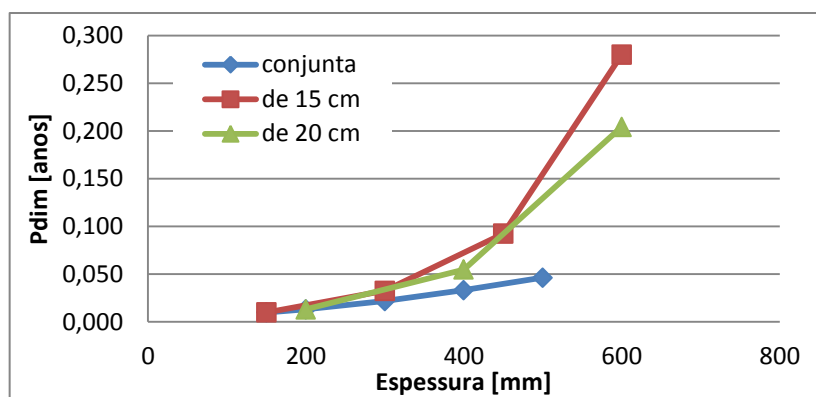


Figura 4.5 Períodos de vida úteis para as diferentes hipóteses

Dados os resultados obtidos neste estudo paramétrico, conclui-se que se deve considerar, para efeitos de estimativa de módulo de deformabilidade com base no módulo do solo de fundação, o conjunto das camadas de material granular, estando assim do lado da segurança. A consideração de camadas com espessura limitada, que pode levar a valores de módulos de deformabilidade pouco realistas (mais de 700 MPa).

#### 4.3.3 Comportamento estrutural equivalente

Para analisar melhor o comportamento das misturas betuminosas, foram estudadas quatro novas hipóteses. Assim, partindo da estrutura do pavimento estudada para a célula 2, mantendo a espessura da camada de material granular ( $h_2 = 30$  cm), optou-se por variar o módulo do solo de fundação de 60 até 200 MPa, e com base nele determinar o módulo correspondente das camadas de material granular. A seguir foi aumentada a espessura da camada em misturas betuminosas ( $h_1 = 11$  cm) por forma a obter um comportamento estrutural equivalente ao da estrutura de referência da célula 2.

Para efeitos de comparações, com os estudos realizados anteriormente, foram também feitas as devidas simulações de rodados, para um eixo padrão de 130 kN.

O Quadro 4.16 apresenta os módulos adotados para as próximas hipóteses.

Quadro 4.16 Módulos das diferentes camadas adoptadas para as hipóteses 1, 2, 3 e 4

Hipótese	1	2	3	4
E1 (MPa)	5000	5000	5000	5000
E2 (MPa)	120	160	240	400
E3 (MPa)	60	80	120	200

**Hipótese 1:** aumenta-se a espessura da primeira camada (mistura betuminosa) até igualar ou aproximar à solução estudada no caso de estudo para a célula 2, mantendo o E1 de 5000 MPa; a segunda camada, de material granular, com uma espessura de 30 cm e um E2 de 120 MPa, e um solo de fundação de 240 cm com E3 de 60 MPa.

Obtendo, Quadro 4.17, as devidas estimativas do período de vida útil para o aumento da espessura.

Quadro 4.17 Período de vida útil para a hipótese 1

Espessura (cm)	E1 Corrigido (MPa)	Critério de ruína		N130	Pdim (anos)
		Nt (fadiga)	Nc (deformação)		
11	4562	6,05E+04	3,49E+05	6,05E+04	0
31	4562	2,91E+07	5,90E+07	2,91E+07	6
51	4562	1,63E+09	1,26E+09	1,26E+09	64
52	4562	1,93E+09	1,43E+09	1,43E+09	67
53	4562	2,28E+09	1,62E+09	1,62E+09	70
55	4562	3,16E+09	2,05E+09	2,05E+09	76
57	4562	4,34E+09	2,58E+09	2,58E+09	82
59	4562	5,91E+09	3,23E+09	3,23E+09	87
61	4562	7,98E+09	4,02E+09	4,02E+09	93
71	4562	3,21E+10	1,09E+10	1,09E+10	118

Dependendo então da espessura da camada da mistura betuminosa, pode-se observar, no gráfico da Figura 4.6, uma progressão linear.

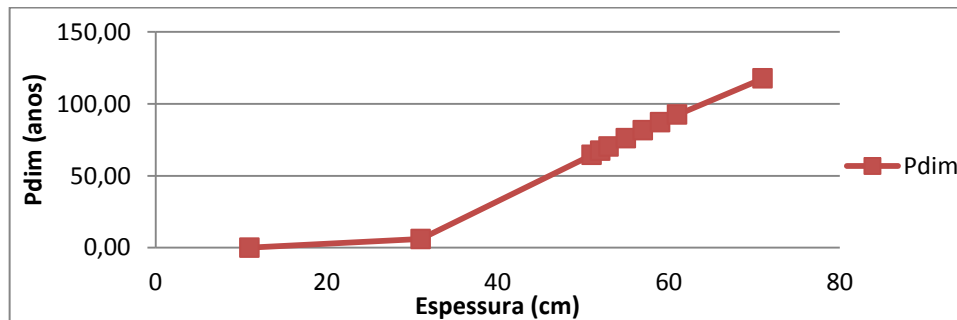


Figura 4.6 Progressão do período de vida útil para a hipótese 1

**Hipótese 2:** uma camada de mistura betuminosa de 11 cm com E1 de 5000 MPa, uma camada de 30 cm de material granular com um E2 de 160 MP, e por fim, uma camada de 240 cm de solo de fundação com o E3 igual a 80 MPa.

**Hipótese 3:** idêntica à hipótese anterior, mudando apenas o E2 para 240 MPa e o E3 para 120 MPa.

**Hipótese 4:** similar às duas anteriores, mas com o módulo da camada granular igual a 400 MPa e o do solo de fundação igual a 200 MPa.

Obtém-se então, no Quadro 4.18, os respetivos períodos de vida útil para estas três hipóteses.

Quadro 4.18 Períodos de vida útil para as hipóteses 2,3 e 4

Hipótese	E1 Corrigido (MPa)	Critério de ruína		N130	Pdim
		Nt (fadiga)	Nc (deformação)		
2	4562	1,12E+05	8,05E+05	1,12E+05	0,0
3	4562	2,89E+05	2,77E+06	2,89E+05	0,1
4	4562	1,12E+06	1,43E+07	1,12E+06	0,3

Fazendo a comparação destas hipóteses com o nosso caso de estudo referente à célula 2, temos no Quadro 4.19, os períodos de vida medianos da célula 2.

Quadro 4.19 Período de vida útil para a célula 2

Célula	Modelação para a força de	Pdim mediano (anos)
C2	25 kN	85
	50 kN	45
	75 kN	79
	90 kN	78
	120 kN	74

De forma mais esclarecedora, na Figura 4.7, observa-se a curva definida por este estudo, e nota-se a ordem de grandeza referida anteriormente.

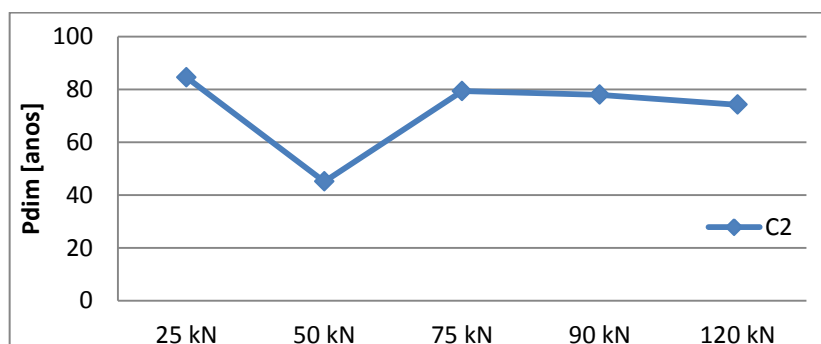


Figura 4.7 Períodos de vida útil medianos para a célula 2

Comparando, então, estes resultados, visa-se uma estimativa de período de vida útil para a célula 2 à volta dos 80 anos.

#### 4.4 Considerações Económicas

Analisando estas observações, estima-se que, um pavimento novo, para ter um período de vida equivalente à nossa célula 2, cuja mistura betuminosa é AC 20 (MB), seria necessário ter uma espessura de mistura betuminosa de 55 a 59 cm.

De tal forma, que, uma camada de 30 cm de material granular de boa qualidade (por exemplo ABGE calcário), que é o caso da célula 2 do nosso caso de estudo, poupa 44 a 48 cm de mistura betuminosa.

Fazendo um balanço do custo do material utilizado no mercado [Antunes et al, 2009] fica-se com o Quadro 4.20, que mostra o preço de cada material, em €/m<sup>2</sup>, em função da espessura.

Quadro 4.20 Custo do material utilizado

Material	Espessura (cm)	Custo €/m <sup>2</sup>
Material granular:		
ABGE	15	2,94
ABGE	20	4,25
Mistura betuminosa:		
Macadame betuminoso	6	4,93
Macadame betuminoso	8	6,60
Macadame betuminoso	12	9,79
Betão betuminoso	5	5,75

Fazendo as contas às várias estruturas estudadas, tem-se que: para o nosso caso de estudo, uma camada de 11 cm de mistura betuminosa mais uma camada de 30 cm de material granular de boa qualidade, fica um total de 16,56€/m<sup>2</sup>; para uma estrutura com uma camada de mistura betuminosa de 44 a 48 cm, sem contar com o material granular, fica associado um custo de 35,97 a 39,16€/m<sup>2</sup>. Poupa-se então, só nestes dois casos, um total de 29,41 a 22,60€/m<sup>2</sup>.

#### 4.5 Considerações finais

Foi visto, que com a correcção dos módulos de deformabilidade da temperatura em campo, 17°C, para a temperatura de projecto, 20°C, os módulos de deformabilidade corrigidos são inferiores aos módulos de deformabilidade dados pelo equipamento. Observou-se ainda, que a diferença, entre estes dois módulos de deformabilidade, aumentava quanto maior fosse o módulo de deformabilidade dado pelo equipamento.

Foram feitos, para os ensaios realizados pelo FWD e DIP, às várias células, o cálculo do período de vida útil de cada pavimento. Verificou-se que, as estimativas dos períodos de vida útil feitas para os mesmos pontos as diferentes forças, rondavam o mesmo valor. Isto é, independentemente do ensaio realizado para cada ponto, os períodos de vida útil estimados, de um modo geral, são todos parecidos.

Foi visto, que para pavimentos considerados com camadas de desgaste desligadas, o critério de ruína associado é apenas o da deformação permanente, uma vez que as extensões, existentes na base da camada de desgaste, são negativas, isto é, a camada encontra-se em compressão.

Com o estudo paramétrico realizado, concluiu-se que, um pavimento com uma camada de regularização em material granular de boa qualidade, dispensa uma grande espessura da camada de desgaste em mistura betuminosa. Com este estudo, na construção de um novo pavimento economiza-se, por volta de 25€/m<sup>2</sup>.

## 5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 5.1 Conclusões

Este estudo pretendeu contribuir para avaliação de infraestruturas rodoviárias através de métodos de ensaio não destrutivos.

Fez-se uma apresentação breve dos materiais utilizados em pavimentos, das características e do comportamento dos mesmos.

Apresentaram-se também os equipamentos normalmente aplicados na avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias, com destaque para os dois equipamentos de ensaios de carga utilizados no âmbito do caso de estudo desta dissertação, nomeadamente o Deflectómetro de Impacto (FWD) e o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP).

Para o estudo da aplicação destes equipamentos na avaliação estrutural de pavimentos foram realizados vários ensaios em quatro infraestruturas rodoviárias diferentes, reproduzidas em modelo físico.

Os resultados obtidos foram retroanalísados, com base num programa linear elástico, para estimar os modelos estruturais dos pavimentos e depois foi avaliada a vida útil dos mesmos para um dado tráfego de projeto, expresso em número de passagens do eixo padrão de 130 kN.

No que respeita ao FWD pode-se concluir que o facto de realizar medições em vários pontos, até 2,10 m de distância do centro de aplicação de carga, permite a avaliação da cada uma das camadas que constitui a infraestrutura de transporte, estimando, através da retroanálise as propriedades de cada uma delas. Foram realizados ensaios em vários pontos em cada célula de pavimento e com aplicação de vários níveis de força. Assim, a retroanálise tem que ser realizada com cuidado, de forma a obter resultados coerentes entre vários pontos de ensaio e para várias forças de ensaio.

Constatou-se que, no caso das camadas em material granular obtém-se um aumento do módulo de deformabilidade da primeira camada com o aumento da força de ensaio enquanto que para as camadas em misturas betuminosas o módulo diminui ligeiramente com o aumento da força de ensaio.

Com o outro equipamento utilizado neste estudo, nomeadamente o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP), foram realizadas duas campanhas de ensaios, com temperaturas diferentes nas camadas de misturas betuminosas. Foi assim possível estudar o efeito da temperatura na resposta destas camadas, concluindo-se que é necessário ter sempre em conta a medição da temperatura durante o ensaio e a correção do módulo retroanalísados no processo de avaliação da capacidade de carga.

Da análise dos ensaios realizados pelo DIP, conclui-se, que o ensaio feito para 15 kN pode ser normalizado para uma força de 25 kN. Isto porque, os módulos de deformabilidade obtidos para ambos os casos são bastante próximos, e qualquer cálculo feito com um deles, dá um erro mínimo que pode ser desprezado.

Da comparação dos valores obtidos com o DIP e com o FWD chegou-se a conclusão que poderá ser utilizado, o primeiro, em substituição ao FWD no caso em que o acesso do mesmo não seja possível, ou não esteja disponível, principalmente para forças de carga baixas, de 25 kN. Os erros obtidos desta comparação são abaixo dos 2%, considerando-se que podem ser desprezados. A estrutura com material granular, na camada de desgaste, foi a mais suscetível a erros, por ser um material não ligado, tendo erros que resultam do assentamento dos geofones na superfície.

É através dos módulos equivalentes que se obtêm melhores aproximações entre os ensaios com o DIP e com o FWD. Isto é, os módulos equivalentes estimados com base na deflexão medida no centro da placa de carga dos dois equipamentos podem ser comparados entre eles e também com os módulos retroanalisados. A aproximação dos módulos obtidos com o DIP e com o FWD é aceitável.

É necessária uma correta avaliação de eventuais defeitos da infraestrutura em análise, sendo que quando esta apresenta camadas desligadas, a não identificação do problema pode ser crucial, afetando bastante a estimativa de módulos de deformabilidade realistas. O programa de cálculo utilizado permite a consideração de camadas parcialmente ou totalmente ligadas. Este tipo de erro pode levar a uma avaliação do comportamento estrutural errada, dando origem quer a períodos de vida na ordem dos 200 anos, quando na realidade, considerando a camada desligada, a estrutura poderá ter uma duração inferior a 1 ano.

A normalização das deflexões para as forças de carga deve ser realizada com cuidado e só para forças próximas das aplicadas no ensaio.

Os ensaios realizados pelo mesmo equipamento, mas para temperaturas diferentes, como já se viu, podem ser interpretados de igual forma. Como tal, qualquer ensaio pode ser feito numa altura do ano qualquer, desde que os valores sejam corrigidos posteriormente para a temperatura de projeto.

A melhor forma para avaliar um pavimento, é recorrendo ao cálculo do período de vida útil, estimado através dos critérios de ruína normalmente adotados para este efeito. É através deste cálculo que se pondera o estado em que se encontra a infraestrutura, e se é necessário algum tipo de intervenção.

Por fim, foi feito um estudo sobre a importância da qualidade do solo de fundação e do material granular, e qual a melhor solução de construção. Notou-se que, se um pavimento for



feito com uma camada granular de muito boa qualidade, a camada de mistura betuminosa poderá ser menos espessa. Este tipo de solução remete então para uma solução bastante mais económica.

Tendo em conta o objetivo deste trabalho, pode-se afirmar que os equipamentos e o programa escolhidos permitiram alcançar os objetivos inicialmente propostos. Os equipamentos não são só fiáveis, como são bastante práticos. O programa de cálculo BISAR, apesar de ser o programa elástico linear, sendo o mais utilizado para este tipo de estudo, é um programa bastante útil nas suas estimativas e permite considerações relativas a ligação entre camadas, promovendo a obtenção de resultados realistas.

## **5.2 Desenvolvimentos futuros**

De modo a complementar este trabalho, propõe-se, como desenvolvimentos futuros, a realização de mais ensaios com o DIP e com o FWD para temperaturas diferentes. De forma a completar as conclusões obtidas para as várias infraestruturas estudadas e para os dois equipamentos escolhidos. Deverão ser estudadas outras estruturas de pavimento, com espessuras de camadas e qualidade dos materiais granulares diferentes.



## 6 Referências Bibliográficas

AASHTO (1986)– *Design Guide for Highway Pavements*.

Alves, T.S.F. (2007) – *Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários, Aplicação prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Andrén, P. (2006) – *Development and Results of the Swedish Road Deflection Tester*. Tese de Licenciatura pela Royal Institute of Technology, Suécia

Antão, A.M.S.N (2009) – *Mecânica dos Solos C*. Sebenta da disciplina. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Antunes, M.L.; Marecos,V.; Neves, J.M. J. – *Avaliação Económica de Diferentes Soluções de Pavimentação ao Longo do Ciclo de Vida das Infra-estruturas Rodoviárias (Relatório Final)*; Relatório 37/2009 – NIRA. Fevereiro de 2009. LNEC

Antunes, M.L. (1993) – *Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaios Dinâmicos*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Arora, J.; Tandon, V.; Nazarian, S. (2006) – *Feasibility Study for Continuous Deflection Testing for Texas Pavements, at Near Highway Speeds*, Project Summary Report 0-4380-S. Center For Transportation Infrastructure Systems.

CE EP (2011) – Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal, S. A. – 14.03 – *Pavimentação. Características dos materiais*.

CE EP (2009a) – Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal, S. A. 14.00 – *Controlo de Qualidade*.

CE EP (2009b) – Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal, S. A. – 15.03 - *Pavimentação. Métodos construtivos*.

CE EP (2009c) – Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal, S. A.– 16.03 - *Pavimentação. Dicionário de rubricas e critérios de medição*.

Carl Bro (2007) – *PRI2100 Falling Weight Deflectometer*. User's Manual.

COST 325 (1997) – *New Road Monitoring Equipment and Methods*, Final Report of the Action, Luxemburgo.

COST 333 (1999) – *Development of New Bituminous Pavement Design Method*, Final Report of the Action. Luxemburgo.

Costa, H.B.C.B.M. (2008) – *Análise de Custos de Ciclo de Vida Relativa a Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

CRBL - *Lacroix Deflectograph*. Sófia, 2004. [Consult. 15. Fev. 2012]. Disponível em <http://www.crbl-bg.net>.

Dias, J.P.M. (2009) – Estudo de Reforço do Pavimento Rodoviário da EN 333-3 entre A25 e Oliveira de Frades. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Domingos, P.M.G. (2007) – Reforço de Pavimento Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Transportes. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Dynatest - *Dynatest FWD/HWD Test Systems*. [Consult. 16. Fev. 2012]. Disponível em <http://www.dynatest.com/>.

Fernandes, J.A.S. (2011) – *Modelação do Comportamento Mecânico de Vias-Férreas*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

FHWA - *Rolling Wheel Deflectometer – A High-Speed Deflection Device to Improve Asset Management*. - FOCUS, 2008. [Consult. 16. Mar. 2009]. Disponível em <http://www.fhwa.dot.gov/management>. FHWA-HRT-08-013

Fontul, S. (2004) – *Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Fontul, S. e Antunes, M.L. (2000) - *1º Congresso Rodoviário Português – LNEC*, vol. II, pp.703-716.

Fortunato, E.M.C. (2005) – *Renovação de Plataformas Ferroviárias – Estudos relativos à Capacidade de carga*. Tese para obtenção do grau de Doutor. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.

Geocisa - *Lacroix Deflectograph*. [Consult. 10. Mar. 2012]. Disponível em <http://www.geocisacarreteras.com>.

Geophysical Survey System – *Roadscan*. [Copyright 2008]. [Consult. 20. Fev. 2009]. Disponível em <http://www.geophysical.com/>

Gopaldas, J; Lodge, R.B.; Wright, A. (2009) – *Developing a New Method for Measuring Pavement Layer Thickness*. Published Project Report PPR390, Transport Research Laboratory.

Govind, K.K. (2010) – *Caracterização Estrutural de Infra-estrutura de Transporte Através de Métodos de Auscultação Não Destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Grontmij-Carl Bro - *Falling Weight Deflectometer*. [Consult. 10. Mar. 2012]. Disponível em <http://www.pavement-consultants.com/>.

Gudishala, R. (2004) – *Development of Resilient Modulus Prediction Models for Base and Subgrade Pavement Layers from in situ Devices Test Results*. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre. Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Sri Krishna Devaraya University, Andra Pradesh, India.

<http://www.fresagem.com.br/foto05.htm>, Consultado a 2. Set. 2012.

<http://www.solocap.com.br/detalhe.asp?idcod=VIGA%20BENKELMAN%20LINEAR%20A%20D3GICA>, Consultado a 2. Set. 2012.

<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/5987/1/5421.pdf> (pág. 55), consultado a 1. Set. 2012.

JAÉ (1995) – *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*.

Mendes, S.F. (2011) – *Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização em Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

NCHRP Report 626 (2009) – *NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, U.S.A..

NCHRP Synthesis 382 (2008) – *Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, U.S.A..

Neves, J.M.C. (2007); *CMIT*; Diapositivos de apoio as aulas de Construção e Manutenção de Infraestruturas de Transportes; Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa; Abril 2007

Neves, J.M.C. (2001) – *Contribuição Para a Modelação do Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Pestana, R.M.M. (2008) – *Contribuição Para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados a Estradas de Baixo Tráfego*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Pinelo, A.M. (1991) – *Projecto e observação de pavimentos Rodoviários*. Programa de Investigação Apresentado a Concurso para Acesso à Categoria de Investigador-Coordenador, LNEC.

Powel, W.D.; Potter, J.F.; Mayhew, H.C.; Nunn, M.E. (1984) – *The Structural design of bituminous roads*. Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 1132.

SHAMROCK INDUSTRIES - *Benkelman Beam*. [Consult. 9. Mar. 2012]. Disponível em <http://www.shamrockind.co.nz>.

Shell (1978) – *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and overlays for roads traffic*. London.

SHRP 2 Renewal Research (2009) – *A Plan for Developing High-Speed, Nondestructive Testing Procedures for Both Design Evaluation and Construction Inspection*, Report S2 – R06 - RW. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, U.S.A..

Silva, L.F.A. (2009) – *Pavimentos Aeroportuários: Análise de Soluções Rígidas e de Soluções Flexíveis*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

Silva, J.P. e Fontul, S. (2010) – *Construção e Manutenção de Pavimentos* – Slides da disciplina do Mestrado em Engenharia Civil- Construções Cíveis, Instituto Politécnico de Leiria, 2010.

Suzuki, C.Y.; Pereira, A.C.O.; Diaz, P.H.; Pita, A.S.; Vicente, P.R.F. (2004) – *Modelos Matemáticos de Correlação Entre Coeficientes de Recalque e Parâmetros da Bacia de Deflexão Medidos com FWD*. 35ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, Brazil.

Tangarrinha, J.A.C. (2012) – *Análise Comparativa de Metodologia para Avaliação das condições de Fundação de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Antunes, M.L.B.C. e Fontul, S. (2006) – *Estudo de Técnicas a Aplicar no Reforço de Pavimentos Flexíveis Fendilhados*. Relatório Final. LNEC.

Antunes, M.L.B.C. (2005) – *Modelação do Comportamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Programa de Investigação para obtenção do título de habilitação. LNEC.

## 7 Anexos

### 7.1 Ensaios realizados com o FWD

#### 7.1.1 Pré-processamento de dados com o FWD

Célula 1 –Alinhamento 1

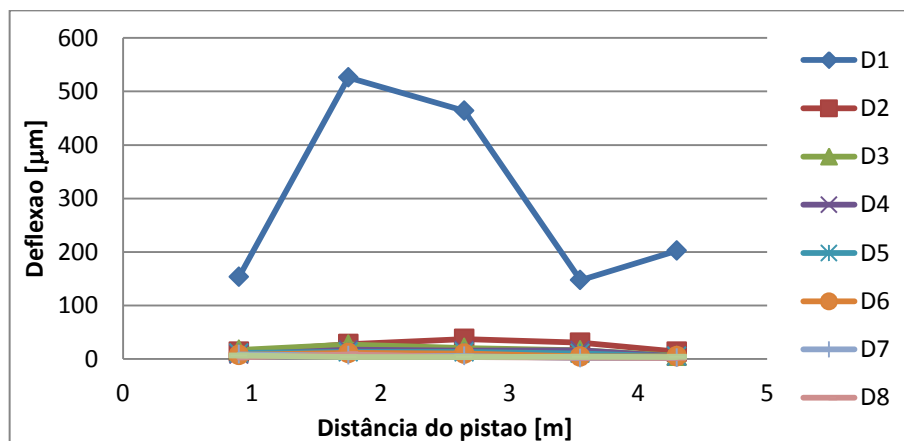


Figura 7.1 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 25 kN

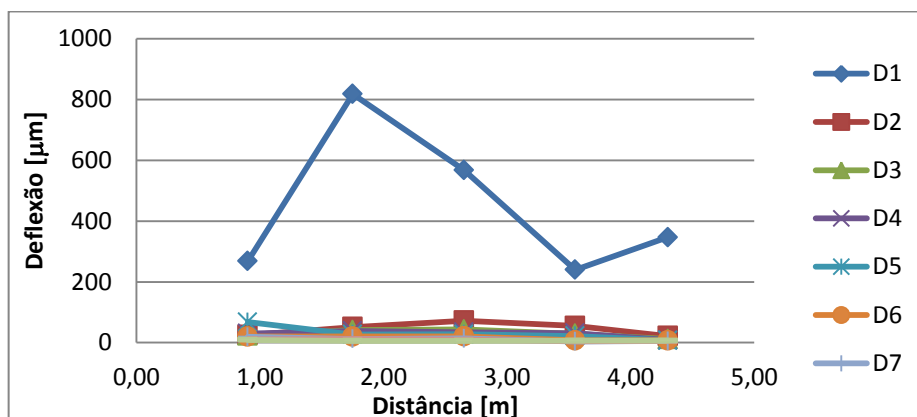


Figura 7.2 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 50 kN

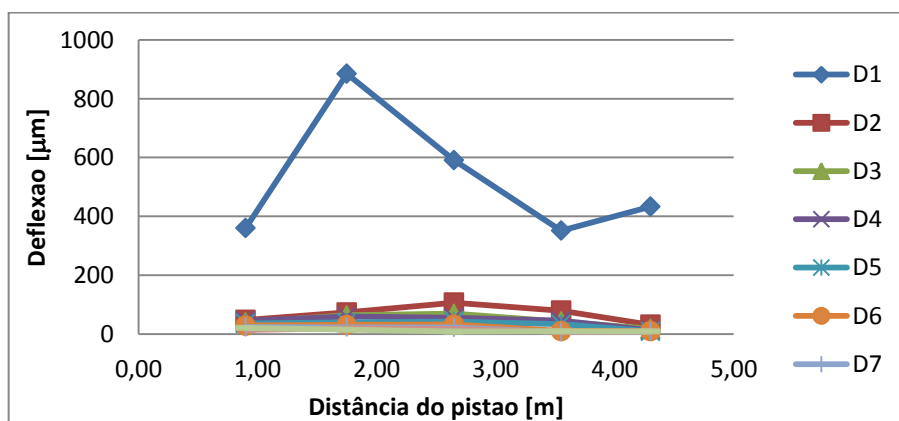


Figura 7.3 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 75 kN

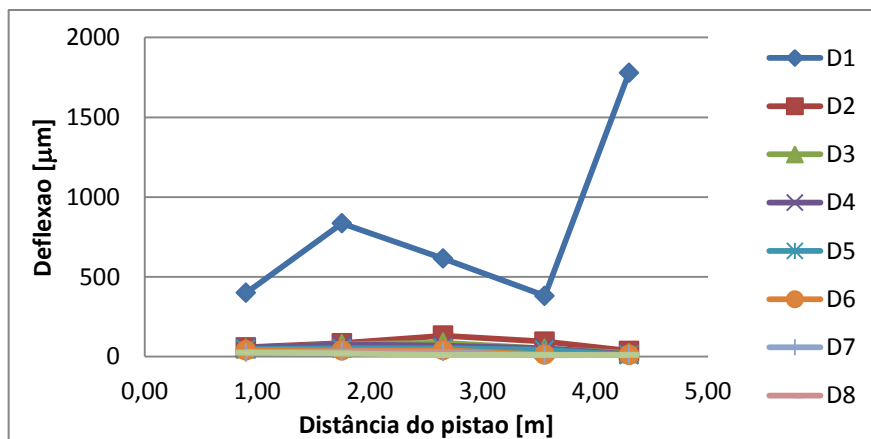


Figura 7.4 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 90 kN

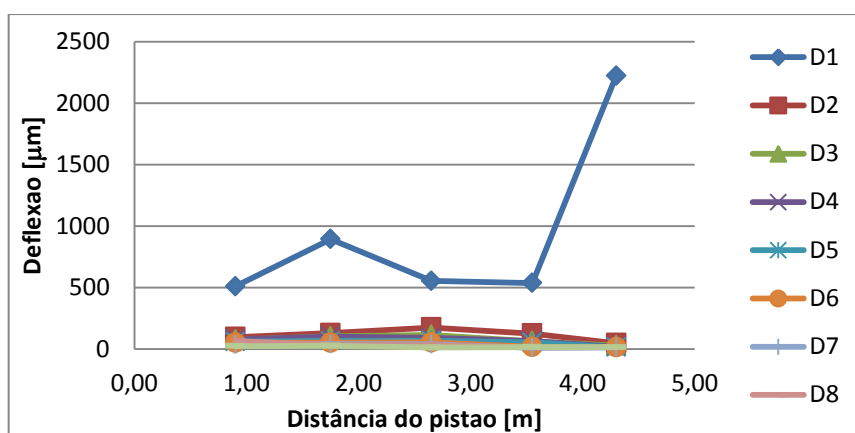


Figura 7.5 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1 a 120 kN

#### Célula 1 – Alinhamento 2

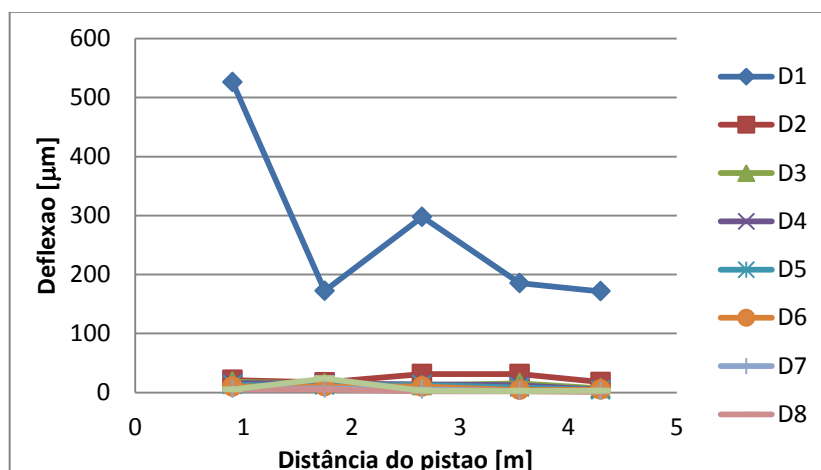


Figura 7.6 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 25 kN



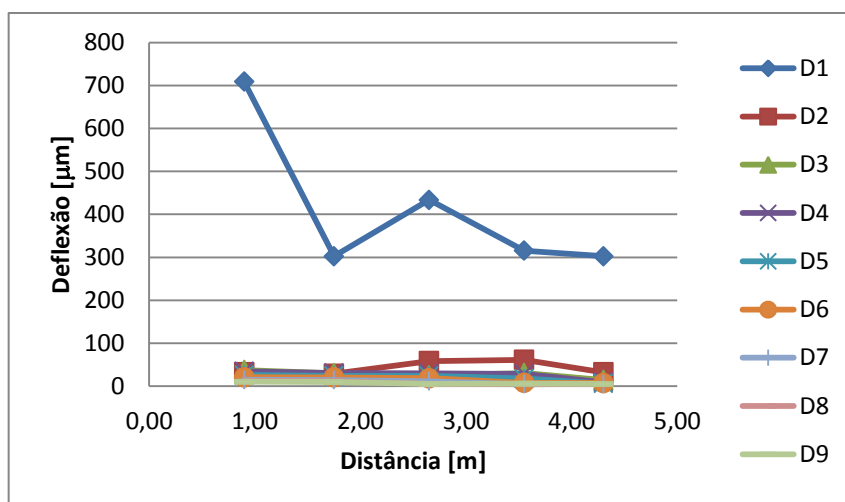


Figura 7.7 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 50 kN

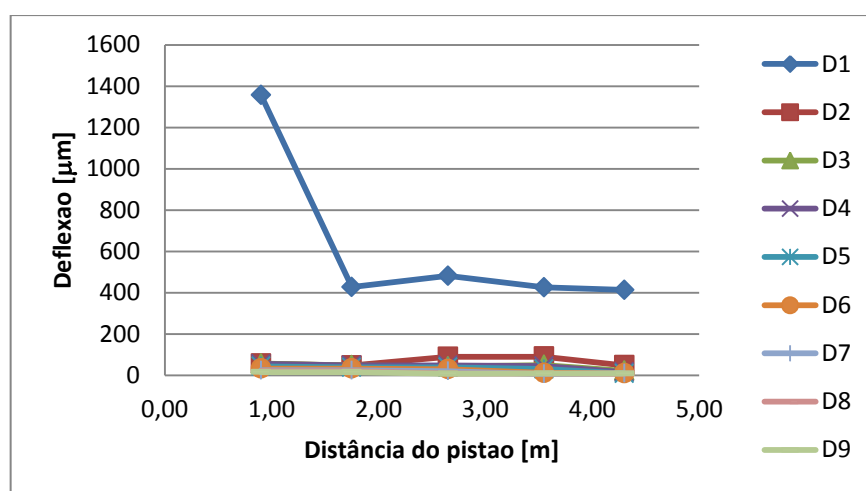


Figura 7.8 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 75 kN

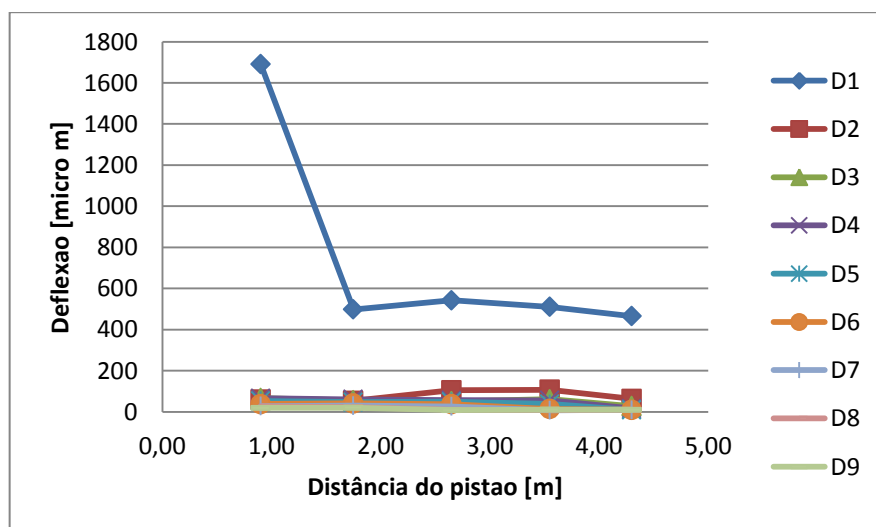


Figura 7.9 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 90 kN

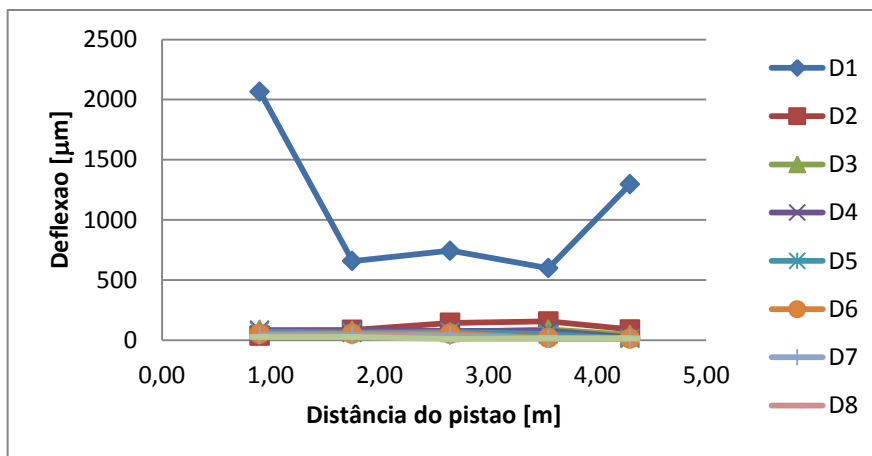


Figura 7.10 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2 a 120 kN

Célula 2 – alinhamento 1

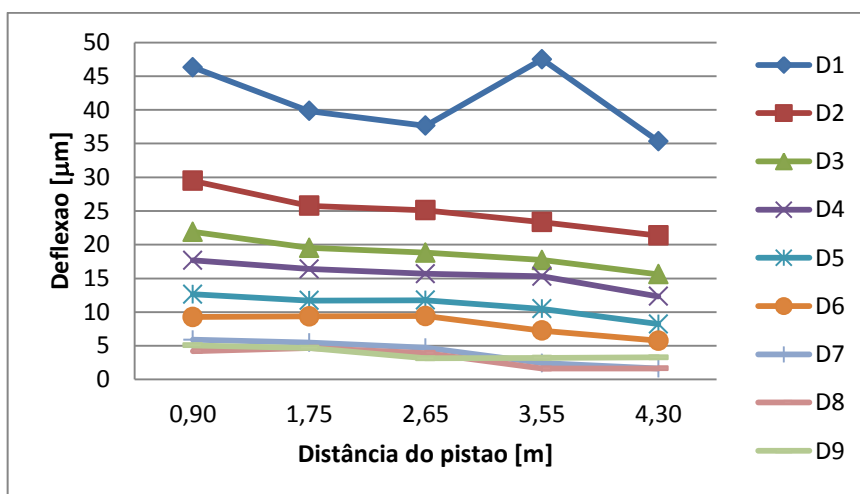


Figura 7.11 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 25 kN

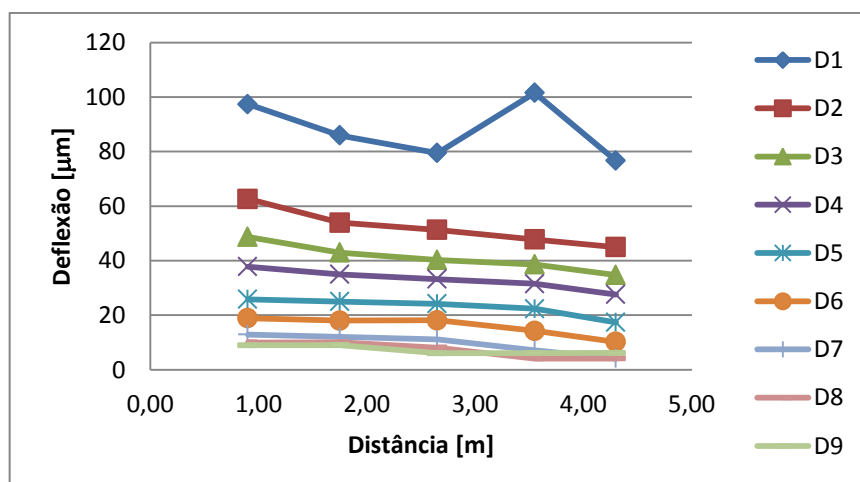


Figura 7.12 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 50 kN

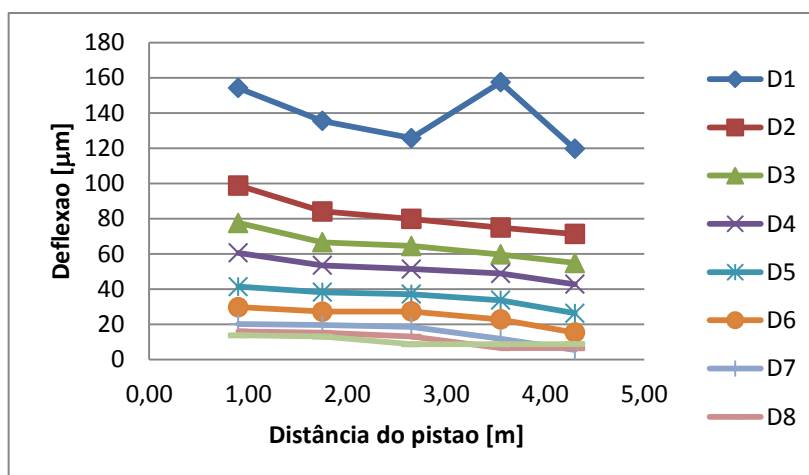


Figura 7.13 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 75 kN

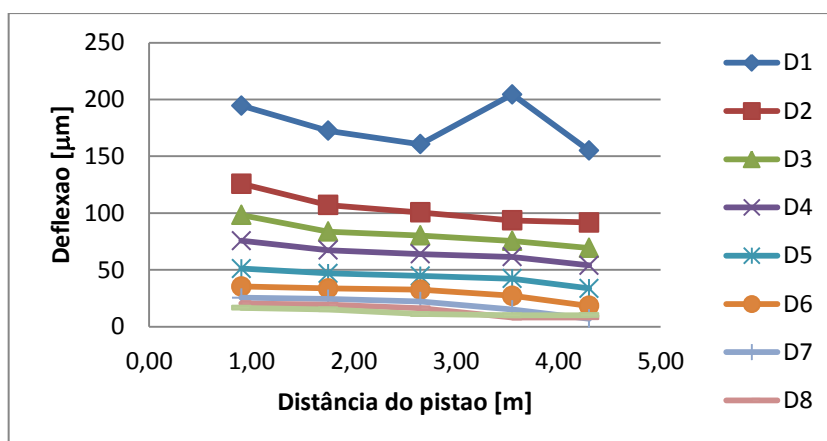


Figura 7.14 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 90 kN

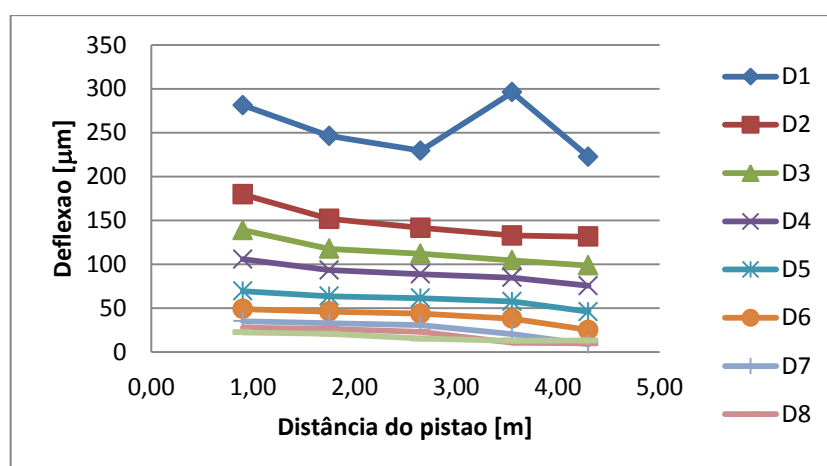


Figura 7.15 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1 a 120 kN

Célula 2 –Alinhamento 2

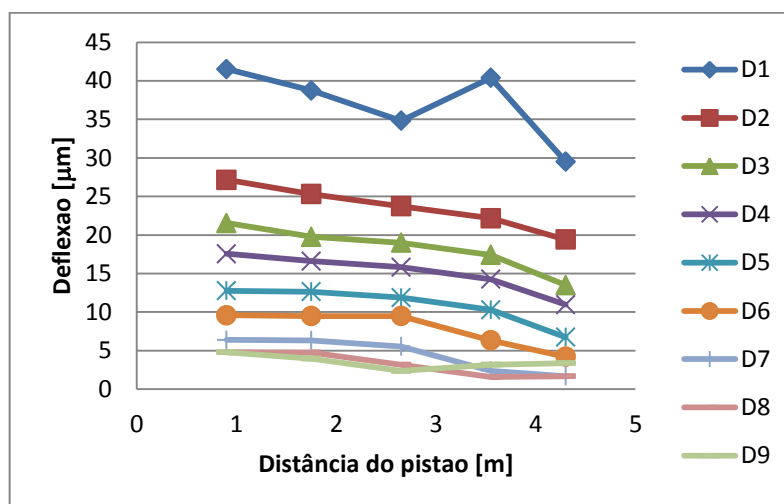


Figura 7.16 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 25 kN

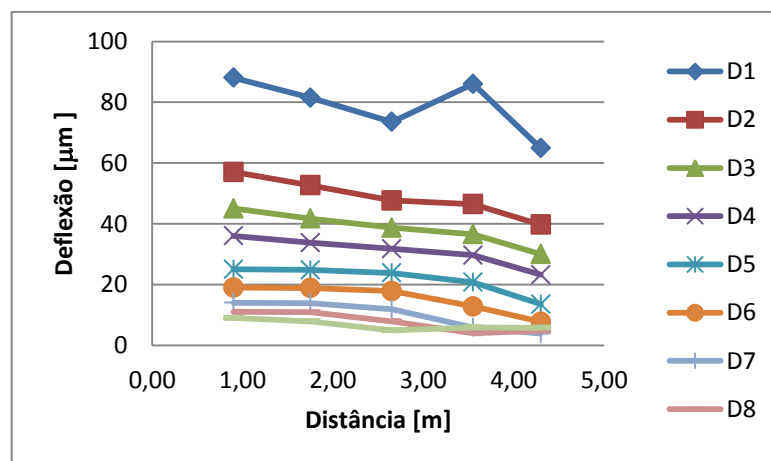


Figura 7.17 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 50 kN

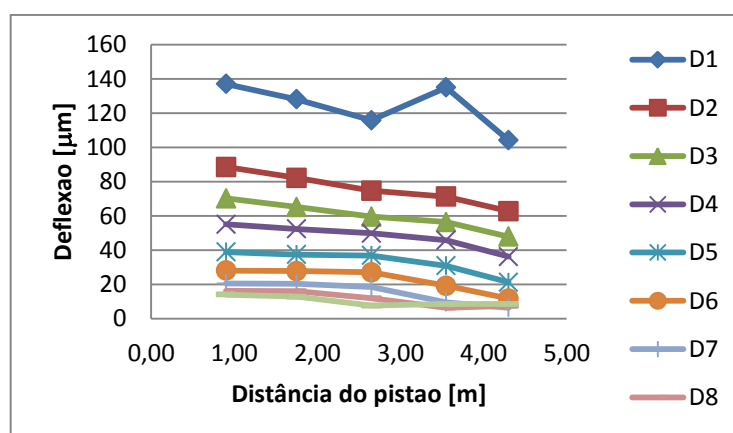


Figura 7.18 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 75 kN

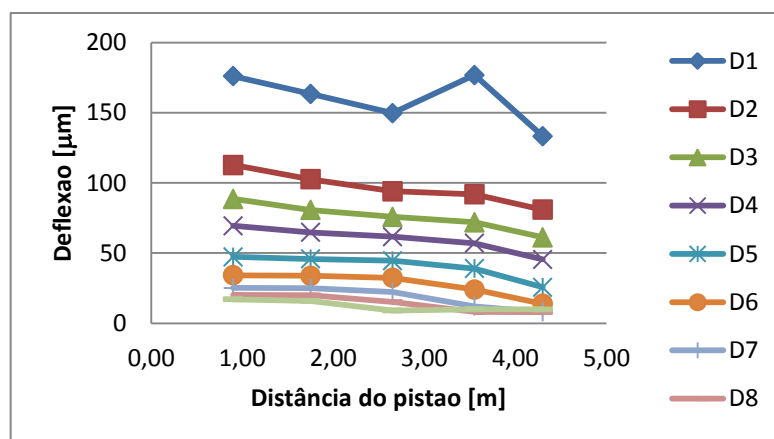


Figura 7.19 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 90 kN

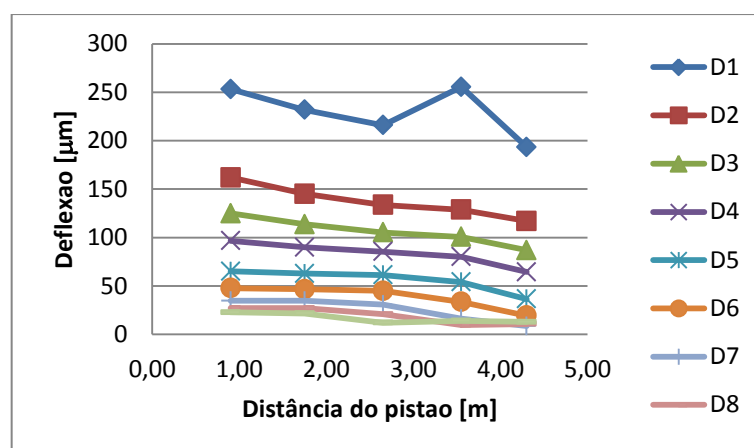


Figura 7.20 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2 a 120 kN

### Célula 3 – Alinhamento 1

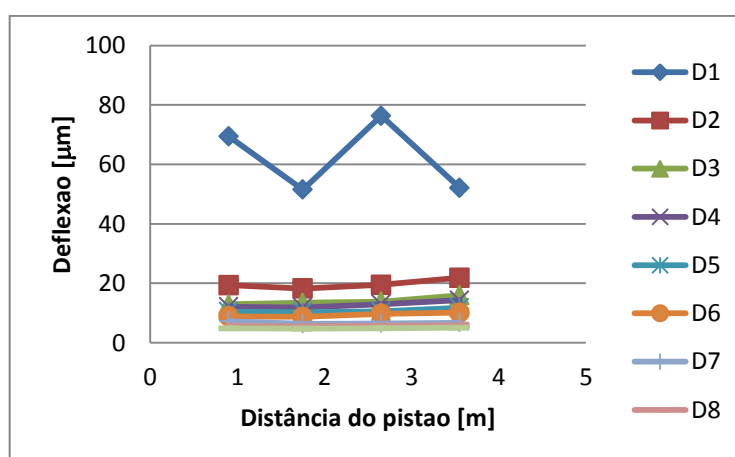


Figura 7.21 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 25 kN

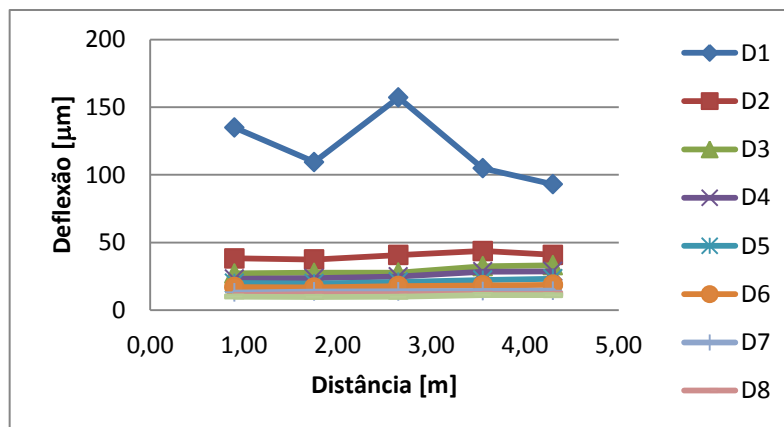


Figura 7.22 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 50 kN

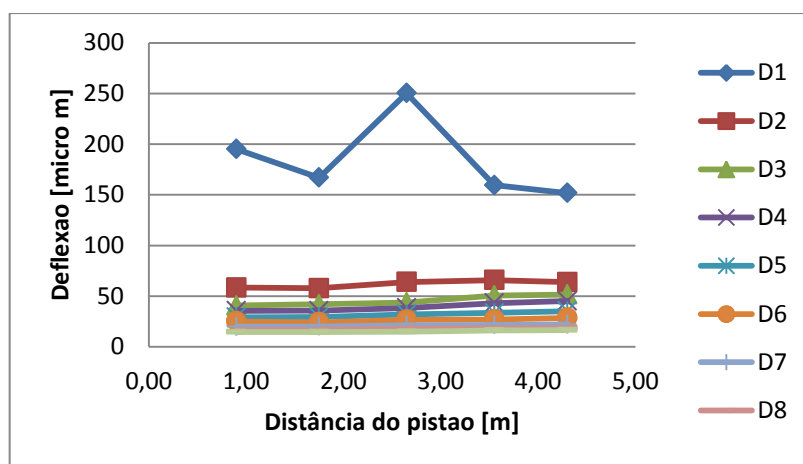


Figura 7.23 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 75 kN

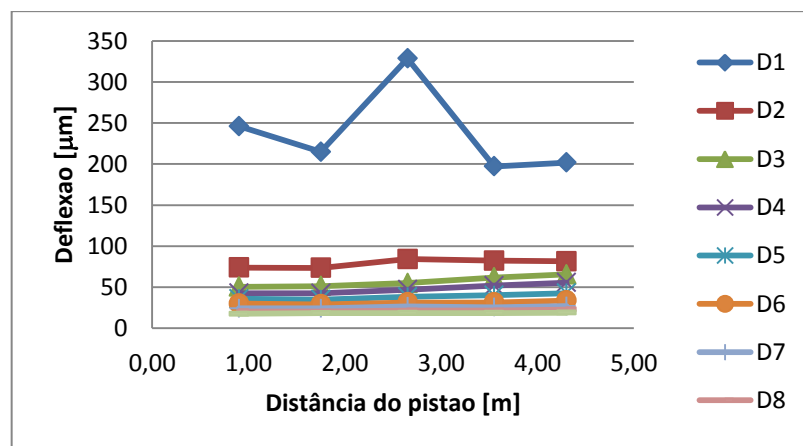


Figura 7.24 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 90 kN

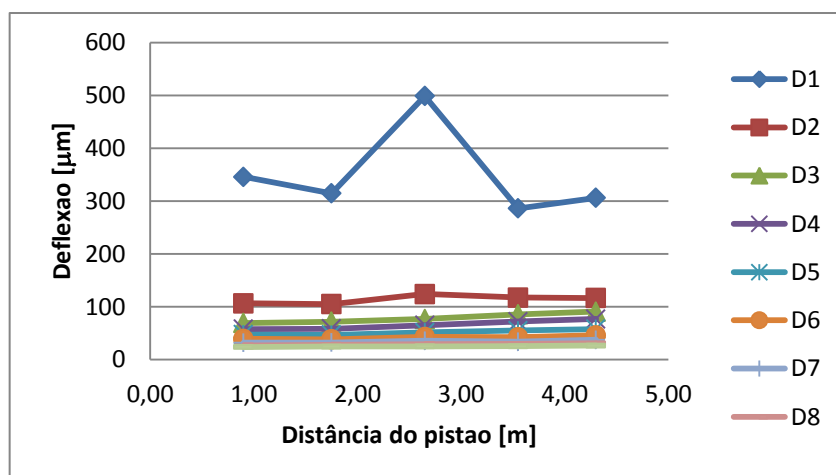


Figura 7.25 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1 a 120 kN

### Célula 3 – Alinhamento 2

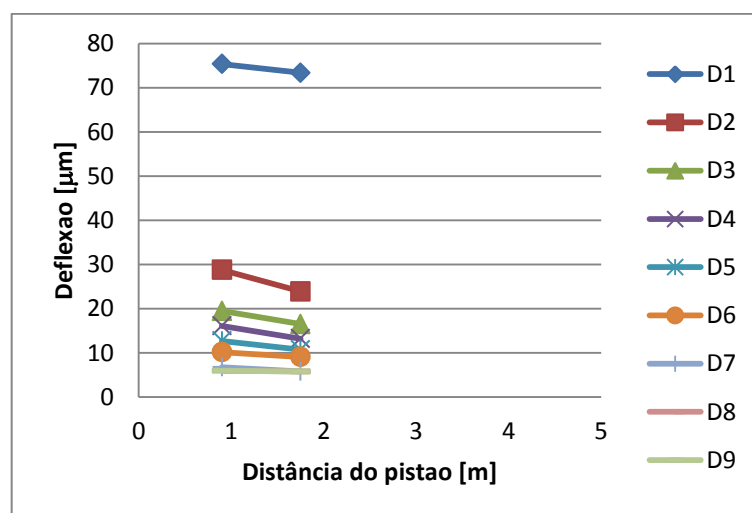


Figura 7.26 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 25 kN

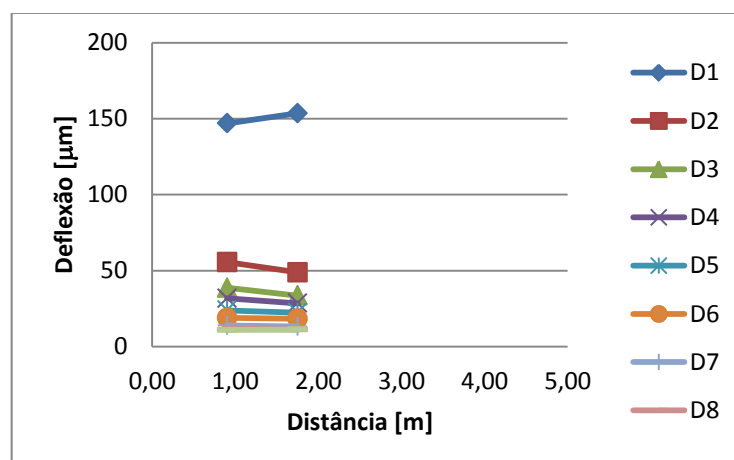


Figura 7.27 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 50 kN

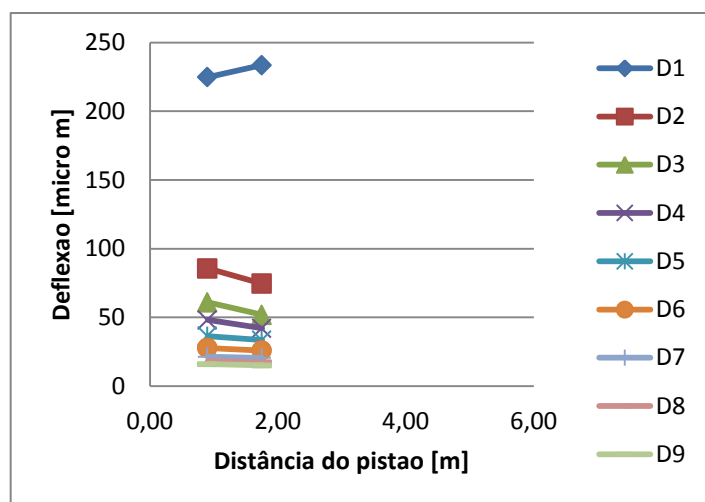


Figura 7.28 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 75 kN

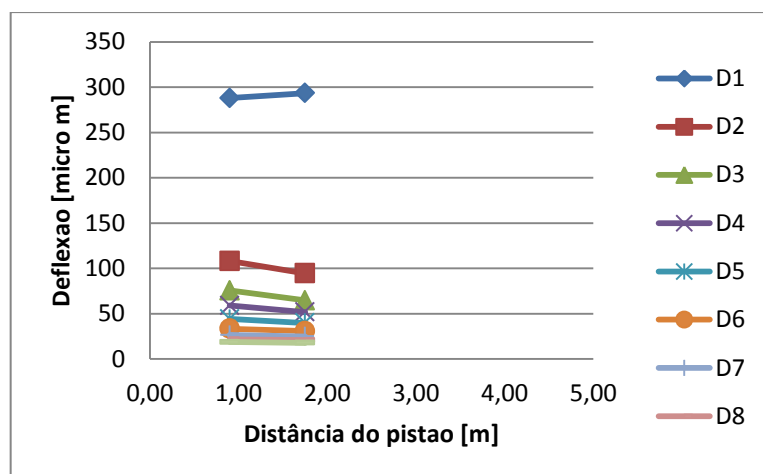


Figura 7.29 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 90 kN

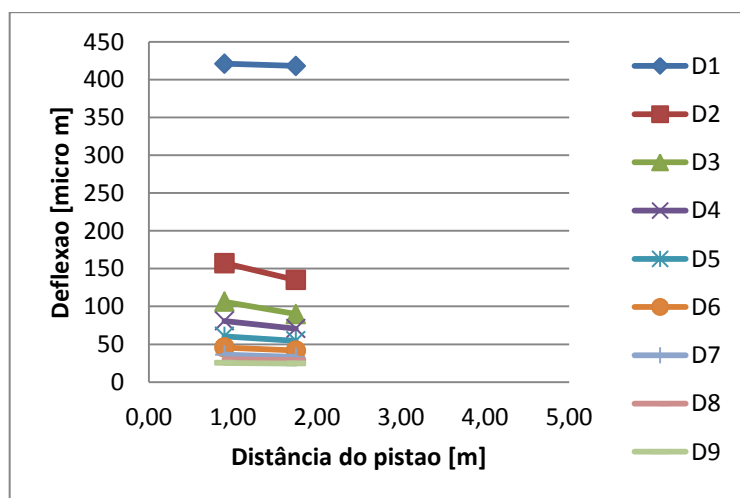
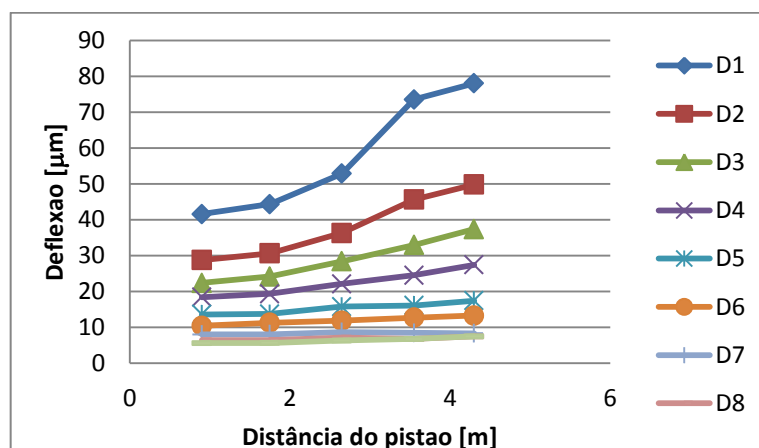
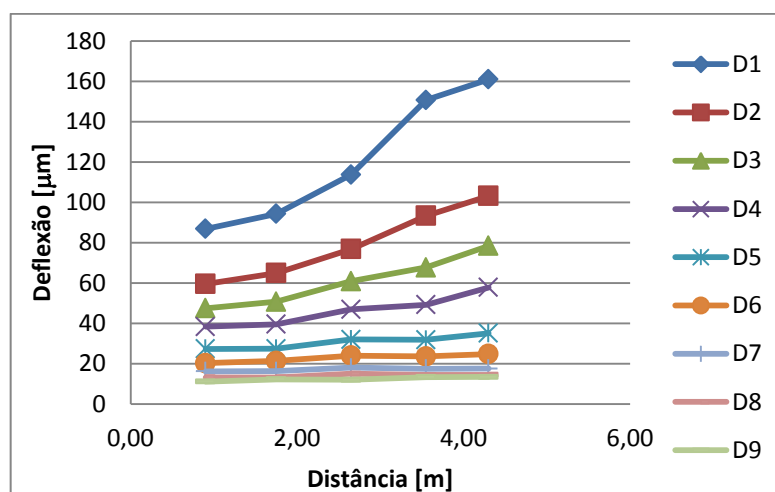
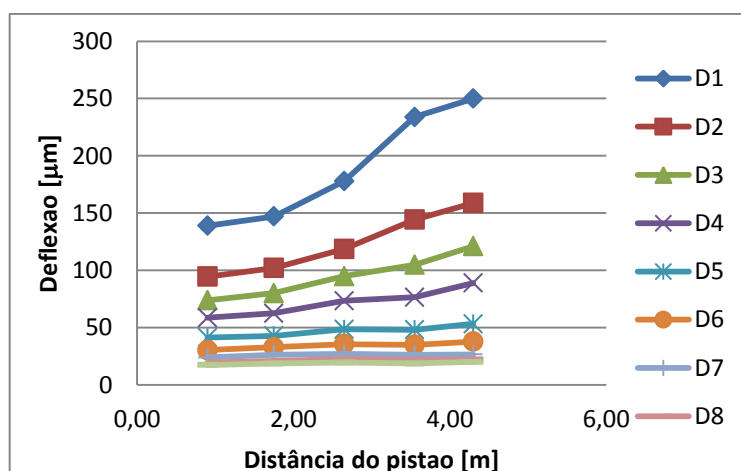


Figura 7.30 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2 a 120 kN



## Célula 4 – Alinhamento 1

Figura 7.31 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 25 kNFigura 7.32 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 50 kNFigura 7.33 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 75 kN

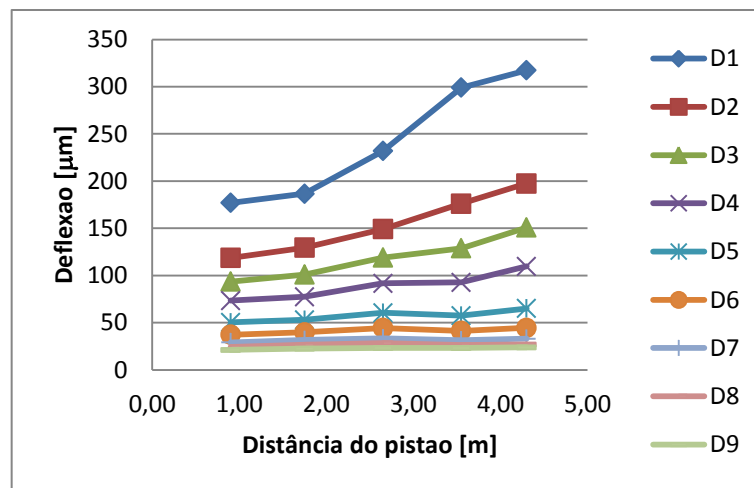


Figura 7.34 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 90 kN

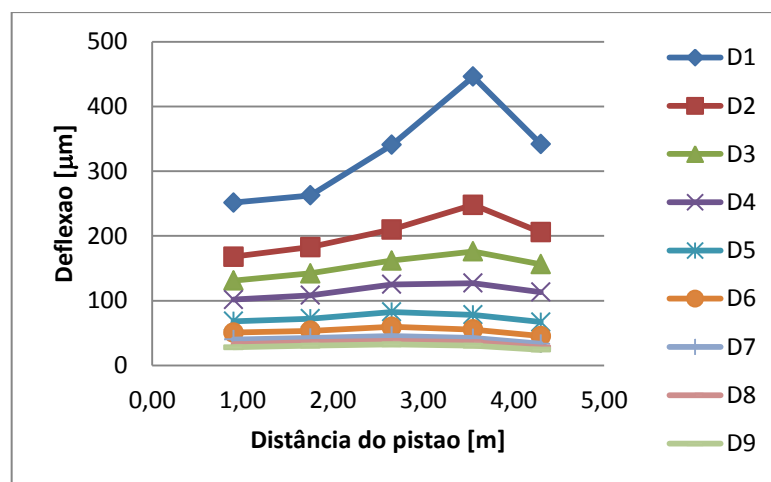


Figura 7.35 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1 a 90 kN

#### Célula 4 – Alinhamento 2

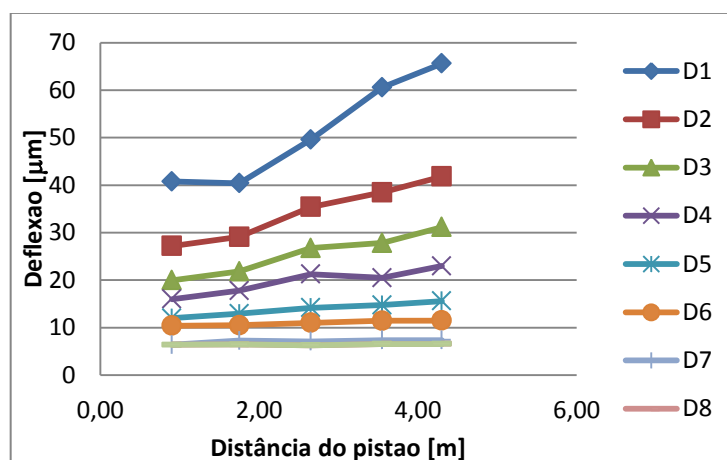


Figura 7.36 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 25 kN

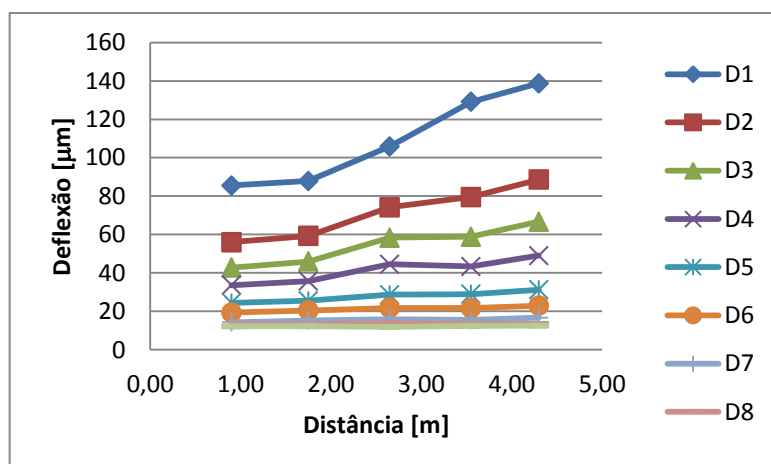


Figura 7.37 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 50 kN

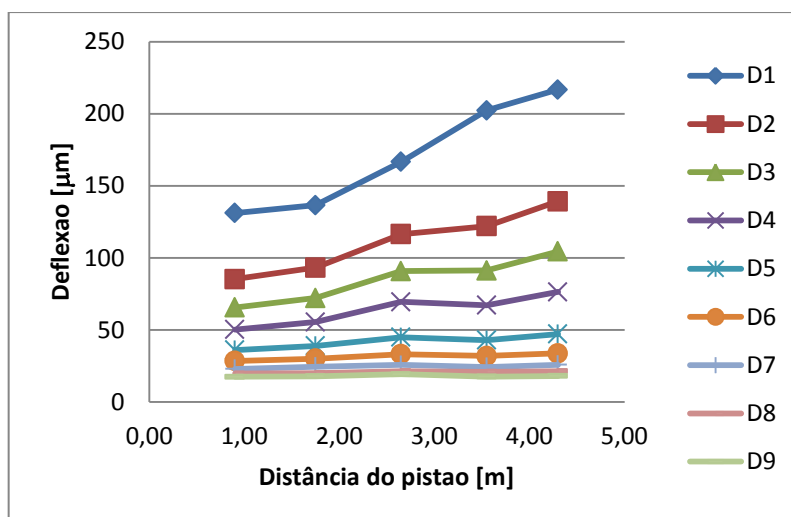


Figura 7.38 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 75 kN

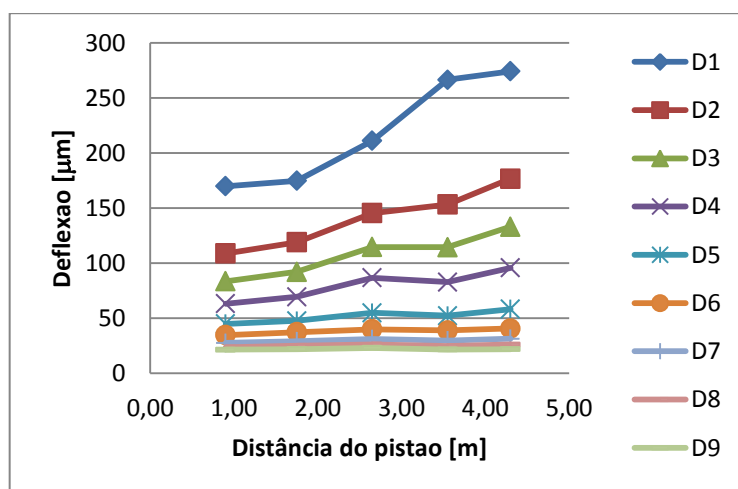


Figura 7.39 Medições (em  $\mu\text{m}$ ) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 90 kN

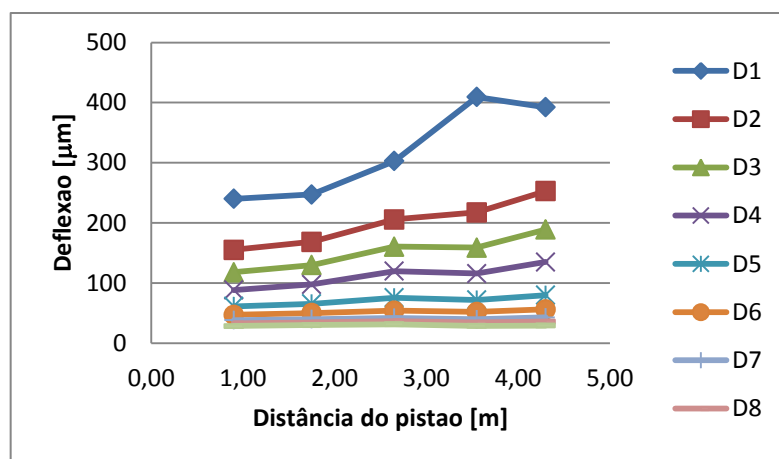


Figura 7.40 Medições (em µm) feitas pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2 a 120 kN

### 7.1.2 Processo de retroanálise

Célula 1 –Alinhamento 1

Quadro 7.1 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 1, alinhamento 1

Força	Distância (m)	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	450	125	145	550	330
	E2	14000	4000	2000	2000	4000
	E3	700	500	500	500	1500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	530	160	250	650	400
	E2	20000	20000	2000	4000	8000
	E3	500	500	500	500	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	2000
75	E1	620	230	380	730	480
	E2	15000	15000	2000	2000	7000
	E3	500	500	500	600	1500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	680	280	500	770	130
	E2	20000	40000	1000	4000	10000
	E3	500	350	500	500	1100
	E4	1500	1500	1500	1500	2000
120	E1	730	350	800	800	140
	E2	30000	40000	1500	1500	10000
	E3	420	500	400	600	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500

## Célula 1 – Alinhamento 2

Quadro 7.2 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 1, alinhamento 2

Força	Distância (m)	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	200	400	200	400	400
	E2	2000	2000	2000	2000	2000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	190	460	340	500	460
	E2	15000	20000	2500	2000	4000
	E3	500	500	500	500	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	2000
75	E1	140	500	500	560	500
	E2	15000	20000	2000	2000	7000
	E3	500	500	500	500	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	140	500	500	580	550
	E2	20000	40000	4000	2000	4000
	E3	500	400	500	500	1100
	E4	1500	1500	1500	1500	2000
120	E1	150	530	500	750	250
	E2	30000	20000	4000	1000	4000
	E3	420	420	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500

## Célula 2 – alinhamento 1

Quadro 7.3 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 2, alinhamento 1

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	5000	5000	5000	3000	5000
	E2	3000	6000	6000	3000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	8000	5000	6000	4000	8000
	E2	2000	5000	5000	2000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
75	E1	6000	7000	7000	4000	6000
	E2	4000	5000	5000	5000	3000
	E3	400	400	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	5000	6000	6000	3000	5000
	E2	3000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	800
	E4	1000	1000	1600	1500	1500
120	E1	3000	4000	5000	2000	4000
	E2	4000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	700
	E4	1000	1000	1600	1500	1500

## Célula 2 –Alinhamento 2

Quadro 7.4 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 2, alinhamento 2

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	5000	5000	5000	3000	5000
	E2	3000	6000	6000	3000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	8000	5000	6000	4000	8000
	E2	2000	5000	5000	2000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
75	E1	6000	7000	7000	4000	6000
	E2	4000	5000	5000	5000	3000
	E3	400	400	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	5000	6000	6000	3000	5000
	E2	3000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	800
	E4	1000	1000	1600	1500	1500
120	E1	3000	4000	5000	2000	4000
	E2	4000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	700
	E4	1000	1000	1600	1500	1500

## Célula 3 – Alinhamento 1

Quadro 7.5 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3, alinhamento 1

Força	Distância	0,9	1,75	2,65	3,55	4,3
25	E1	260	430	260	600	-
	E2	8000	8500	5500	5000	-
	E3	500	500	500	500	-
	E4	1000	1000	1000	1000	-
50	E1	270	400	240	590	1300
	E2	8000	8500	5500	5000	4000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	260	330	200	590	500
	E2	15000	15000	9000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
90	E1	240	330	180	550	400
	E2	15000	10000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
120	E1	220	240	150	470	310
	E2	15000	20000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800



## Célula 3 – Alinhamento 2

Quadro 7.6 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3, alinhamento 2

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	670	430	260	210	8000
	E2	2000	3000	5500	5000	4000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1500
50	E1	720	320	240	590	1300
	E2	2000	3500	5500	5000	4000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	310	260	200	590	500
	E2	5000	6000	9000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
90	E1	210	210	180	550	400
	E2	10000	10000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800
120	E1	180	170	150	470	310
	E2	10000	15000	8000	5000	9000
	E3	400	400	400	500	400
	E4	900	900	900	1000	800

## Célula 3 – Alinhamento 1 camada desligada

Quadro 7.7 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3 c. desligada, alinhamento 1

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	450	1000	400	1200	0
	E2	4000	4000	4000	4000	0
	E3	800	800	700	600	0
	E4	1000	1000	1000	1000	0
50	E1	500	800	370	1200	1800
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	700	800	700	600	600
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	550	800	360	1100	1500
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	750	750	700	600	600
	E4	1000	1000	900	1000	1000
90	E1	500	750	300	1000	1100
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	700	700	600	600	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
120	E1	450	550	240	710	750
	E2	4000	4000	4000	4000	4000
	E3	800	800	700	600	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1000

## Célula 3 – Alinhamento 2 camada desligada

Quadro 7.8 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 3 c. desligada, alinhamento 2

Força	Distância	0,90	1,75
25	E1	5000	1100
	E2	1500	2000
	E3	600	700
	E4	1000	1000
50	E1	5500	1000
	E2	1500	2000
	E3	600	700
	E4	1000	1000
75	E1	5000	1100
	E2	1500	1800
	E3	600	700
	E4	1000	1000
90	E1	5000	800
	E2	1500	2000
	E3	500	600
	E4	1000	1000
120	E1	12000	12000
	E2	1000	1000
	E3	600	700
	E4	1000	1000

## Célula 4 – Alinhamento 1

Quadro 7.9 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 4, alinhamento 1

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	8000	12000	11000	2500	2600
	E2	4000	2800	2000	800	1000
	E3	500	450	400	450	350
	E4	1500	1500	1000	1000	800
50	E1	9000	9500	8000	6500	5000
	E2	6000	4000	2200	800	800
	E3	400	400	400	400	400
	E4	1000	1000	1000	1000	1000
75	E1	9000	11000	14000	6000	5500
	E2	4000	2500	1000	800	800
	E3	400	400	400	400	350
	E4	1500	1500	1000	1000	1000
90	E1	5500	6500	8800	5000	7500
	E2	5200	3500	1200	750	500
	E3	400	400	400	400	350
	E4	1000	1000	1000	1000	900
120	E1	5500	8500	10000	3500	9500
	E2	4000	2500	700	700	700
	E3	400	400	400	400	400
	E4	1000	800	800	800	1000

## Célula 4 – Alinhamento 2

Quadro 7.10 Módulo de Deformabilidade obtidos pelo FWD para a célula 4, alinhamento 2

Força	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
25	E1	8000	9000	7000	6500	3800
	E2	4000	4000	3000	1500	1500
	E3	500	450	450	400	400
	E4	1500	1500	1000	1500	1000
50	E1	8000	9000	9000	6500	3800
	E2	4000	4000	2000	1500	1500
	E3	500	450	450	400	400
	E4	1500	1500	1000	1500	1000
75	E1	7500	8000	9500	5500	4500
	E2	4000	4000	1400	1500	1500
	E3	500	450	450	400	380
	E4	1500	1500	1000	1500	1000
90	E1	5600	5800	9000	3800	5500
	E2	3500	3500	1200	1500	900
	E3	500	450	450	400	400
	E4	1500	1500	1000	1500	1000
120	E1	5000	6000	11000	2000	5200
	E2	3000	2500	700	1500	700
	E3	500	450	450	400	400
	E4	1500	1500	1000	1500	1000

### 7.1.3 Análise de resultados

Célula 1 –Alinhamento 1

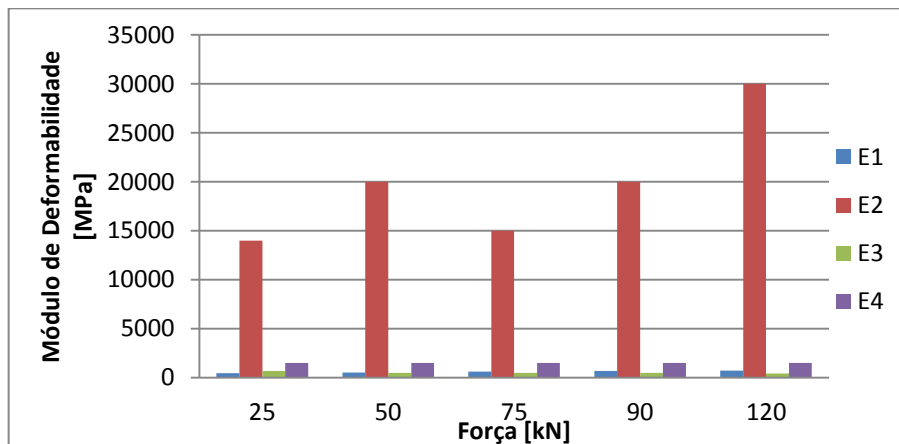


Figura 7.41 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 0,90 m, alinhamento 1

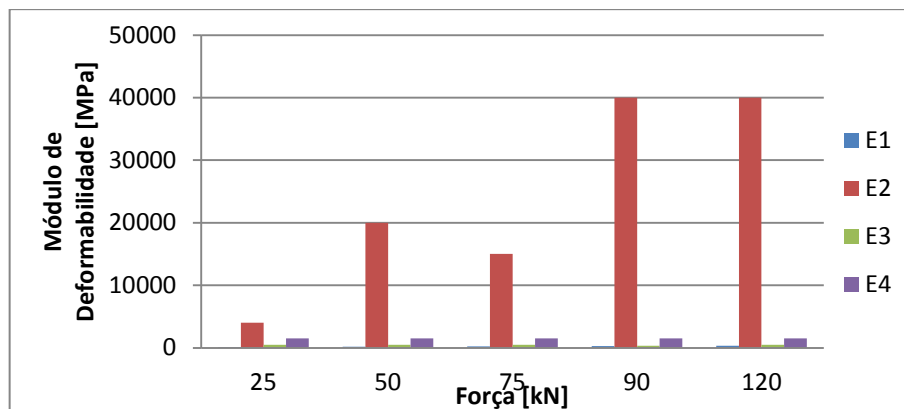


Figura 7.42 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 1,75 m, alinhamento 1

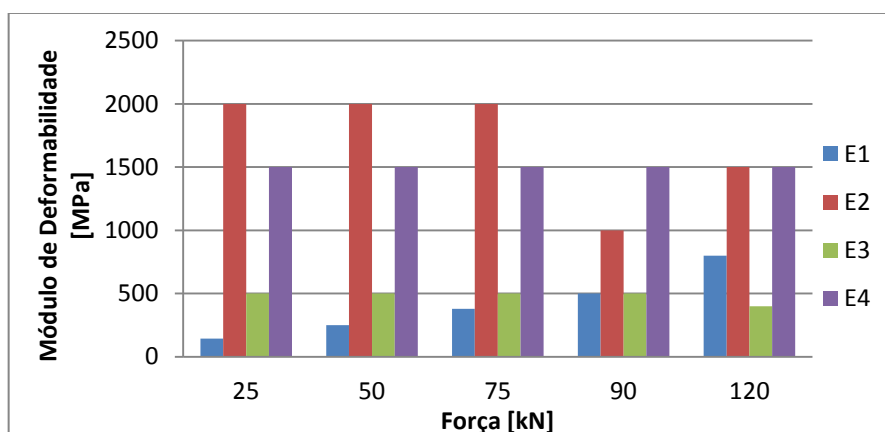


Figura 7.43 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 2,65 m, alinhamento 1

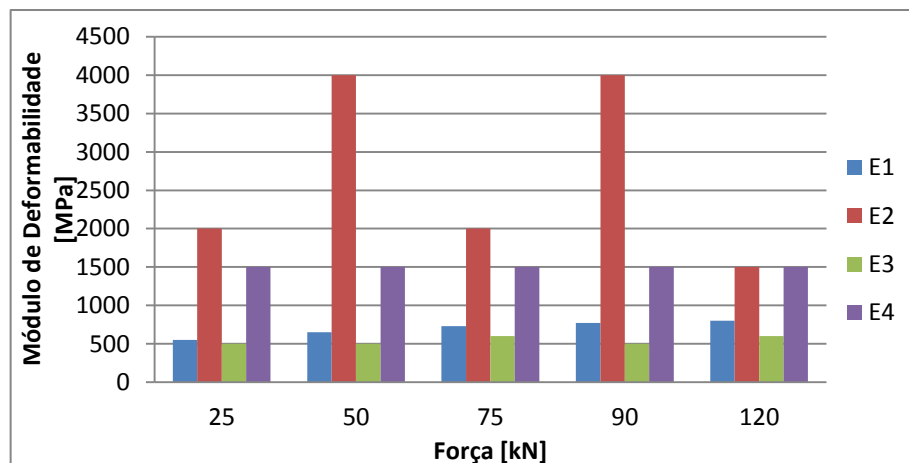


Figura 7.44 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 3,55 m, alinhamento 1

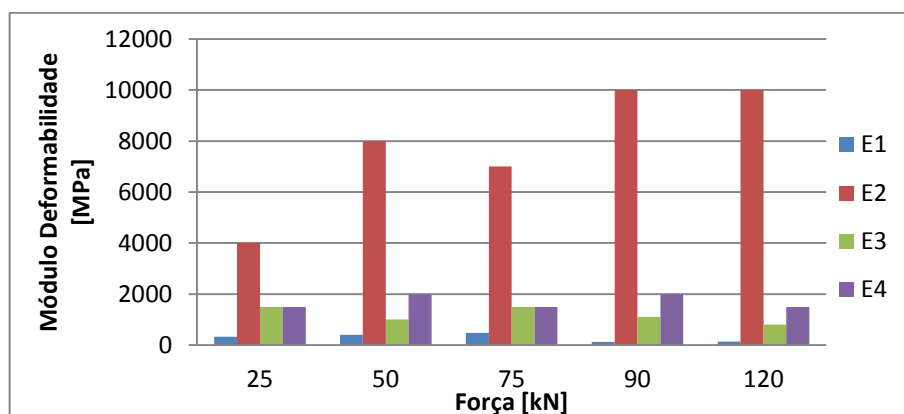


Figura 7.45 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, à distância de 4,30m, alinhamento 1

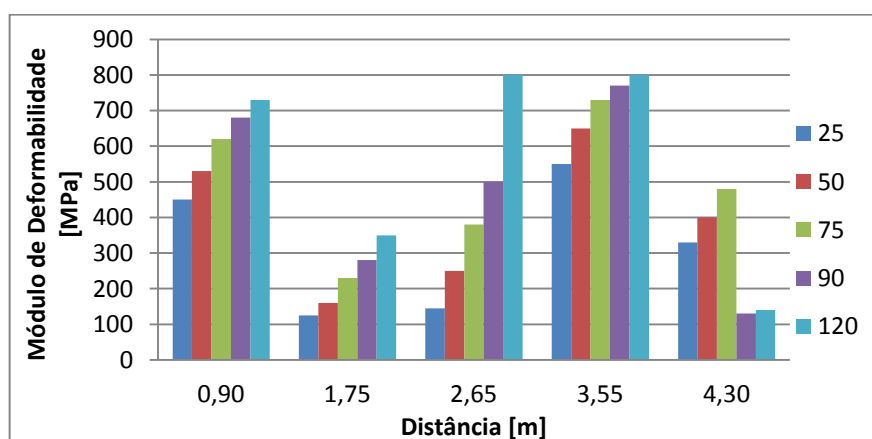


Figura 7.46 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, da camada 1, alinhamento 1

### Célula 1 – Alinhamento 2

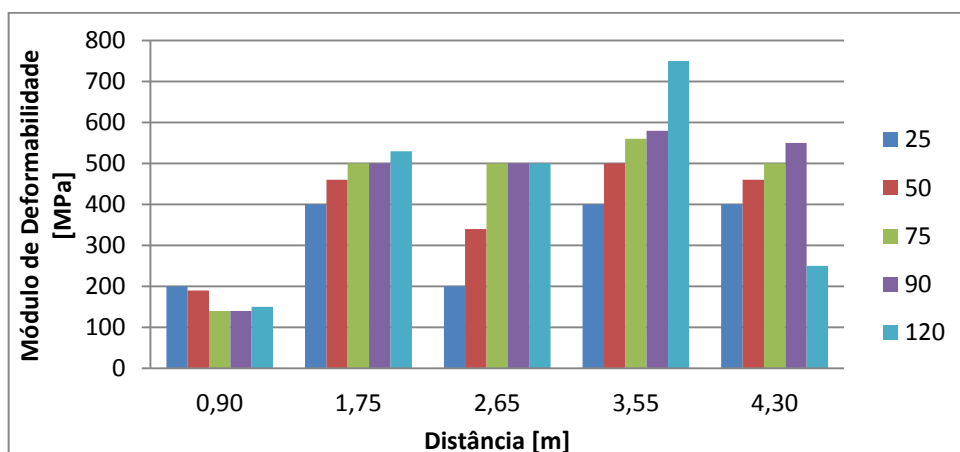


Figura 7.47 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 1, da camada 1, alinhamento 2

### Célula 2 – alinhamento 1

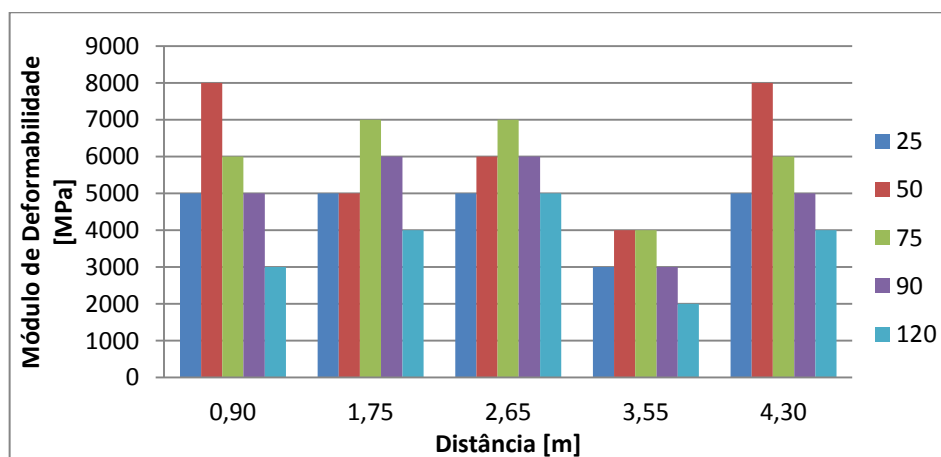


Figura 7.48 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2, da camada 1, alinhamento 1

### Célula 2 – Alinhamento 2

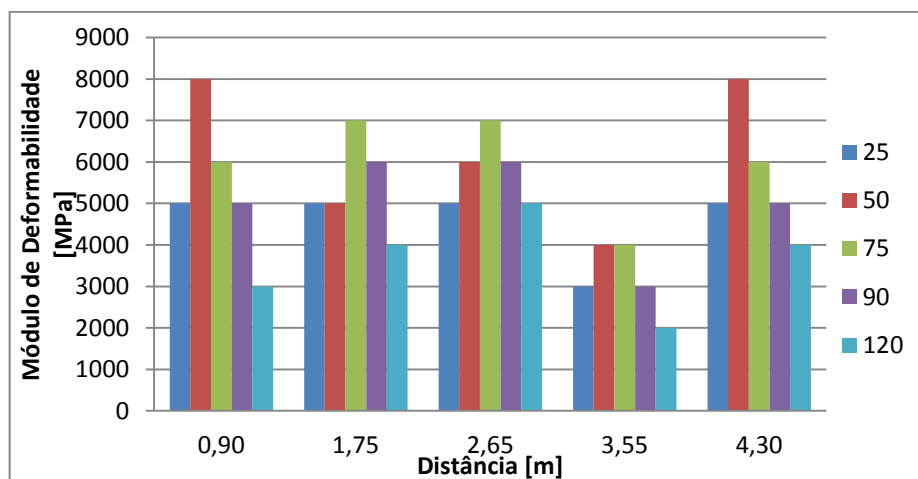


Figura 7.49 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 2, da camada 1, alinhamento 2



## Célula 3 – Alinhamento 1

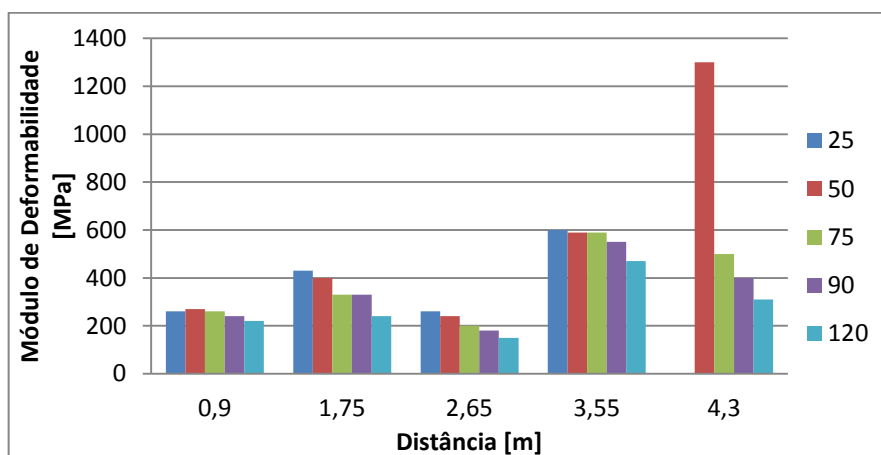


Figura 7.50 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3, da camada 1, alinhamento 1

## Célula 3 – Alinhamento 2

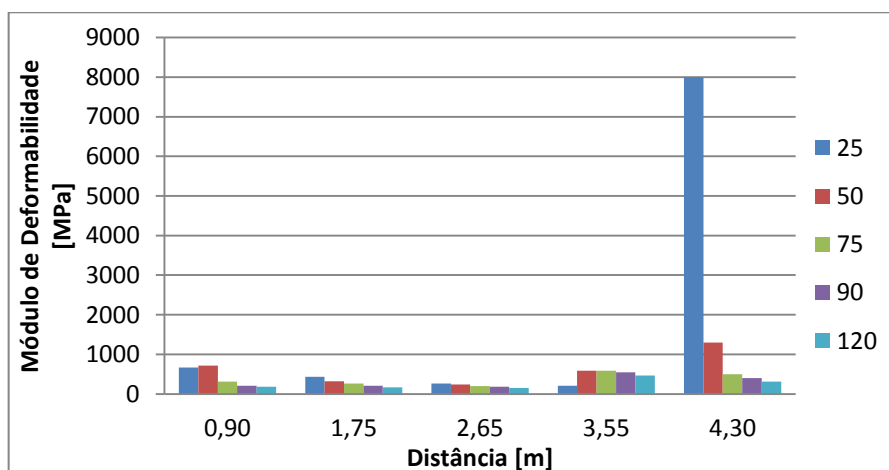


Figura 7.51 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3, da camada 1, alinhamento 2

## Célula 3 – Alinhamento 1 camada desligada

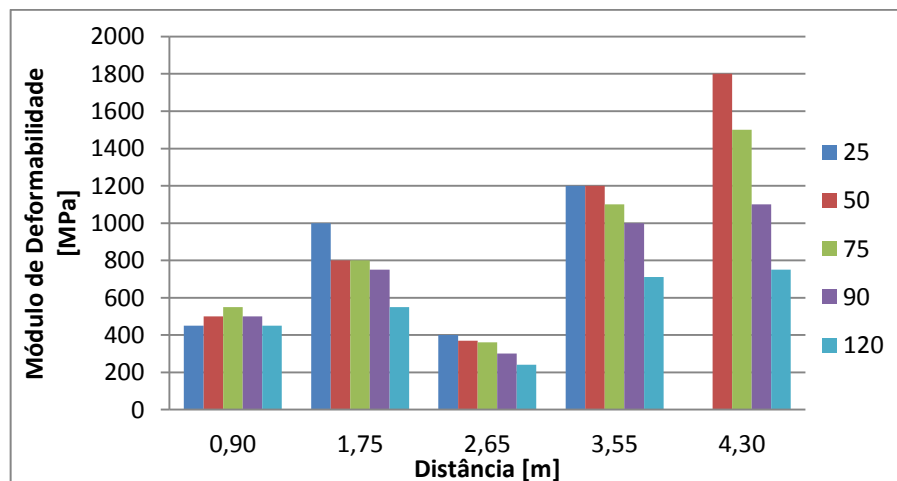


Figura 7.52 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3 c. desligada, da camada 1, alinhamento 1

Célula 3 – Alinhamento 2 camada desligada

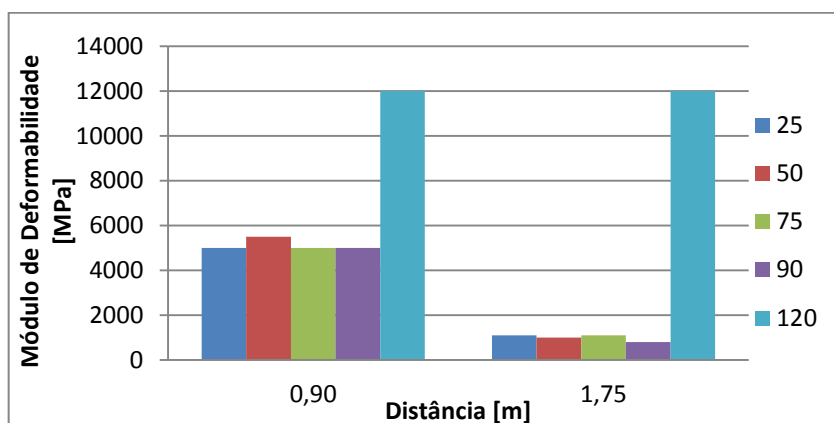


Figura 7.53 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 3 c. desligada, da camada 1, alinhamento 2

Célula 4 – Alinhamento 1

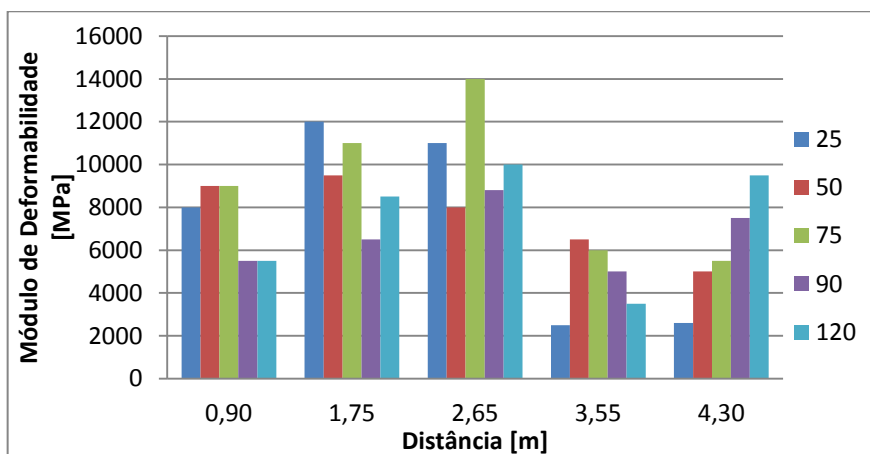


Figura 7.54 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 4, da camada 1, alinhamento 1

Célula 4 – Alinhamento 2

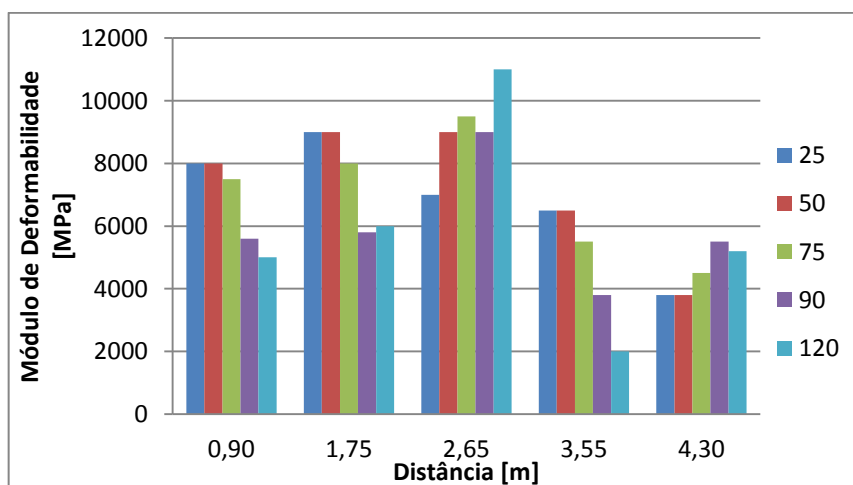


Figura 7.55 Deflexões obtidas pelo FWD para a célula 4, da camada 1, alinhamento 2

## 7.2 Ensaios realizados com o DIP

### 7.2.1 Pré-processamento de dados

DIP 2

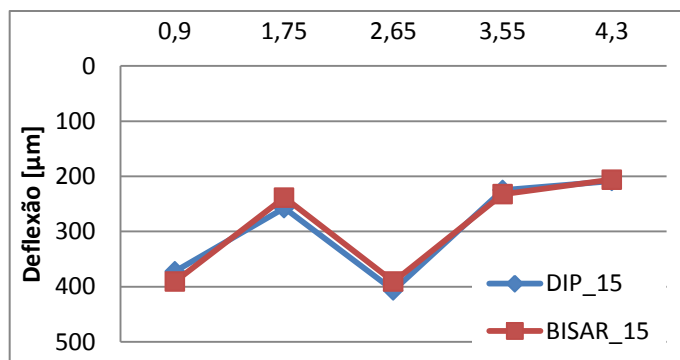


Figura 7.56 Retroanálise da célula 1, a 15 kN, pelo DIP 2

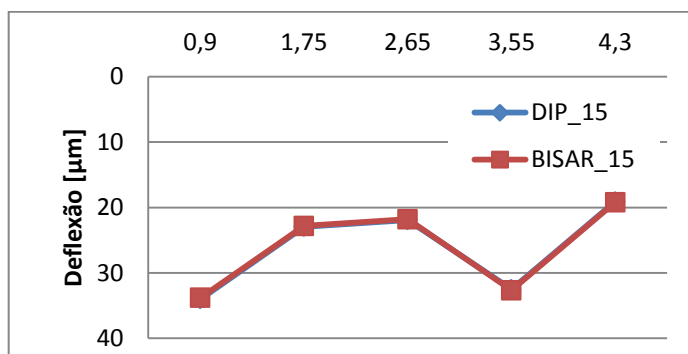


Figura 7.57 Retroanálise da célula 2, a 15 kN, pelo DIP 2

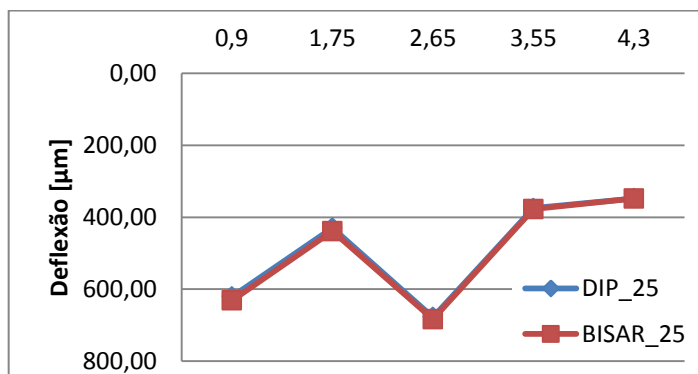


Figura 7.58 Retroanálise da célula 1, a 25 kN, pelo DIP 2

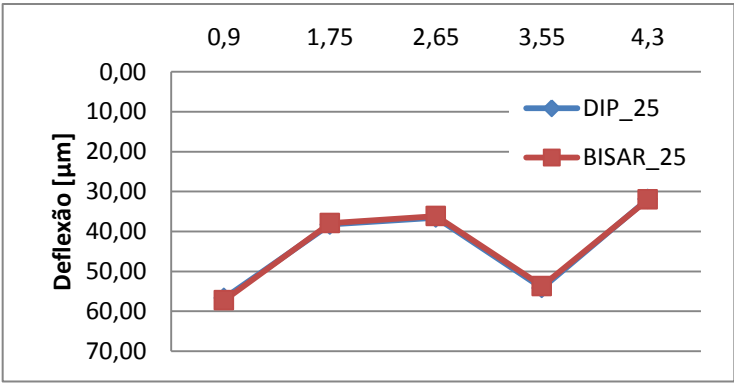


Figura 7.59 Retroanálise da célula 2, a 25 kN, pelo DIP 2

7.2.2 Processo de retroanálise

DIP 1

Quadro 7.11 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 1 a 15 kN

BISAR - 15kN						
Célula	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
C1	E1	-	-	-	160	-
	E2	-	-	-	2000	-
	E3	-	-	-	500	-
	E4	-	-	-	1500	-
C2	E1	6000	6000	7000	400	9000
	E2	5000	5000	5000	250	5000
	E3	1000	1000	1000	300	1000
	E4	1500	1500	1500	900	1500
C3	E1	650	5500	650	750	1050
	E2	1000	2500	1500	1500	1500
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1500
C4	E1	9500	8000	9000	5500	2800
	E2	5000	5000	2000	2000	2000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500

Quadro 7.12 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 1 a 25 kN

BISAR - 25kN						
Célula	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
C1	E1	-	-	-	160	-
	E2	-	-	-	2000	-
	E3	-	-	-	500	-
	E4	-	-	-	1500	-
C2	E1	7500	7500	7500	400	330
	E2	6000	6000	6000	250	4000
	E3	800	800	800	300	1500
	E4	1500	1500	1500	900	1500
C3	E1	200	790	290	330	400
	E2	6000	6500	5500	4500	4000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1500
C4	E1	12000	12000	11000	3500	3000
	E2	4000	4000	3000	4000	4000
	E3	500	450	400	450	350
	E4	1500	1500	1000	1000	800

DIP 2

Quadro 7.13 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 2 a 15 kN

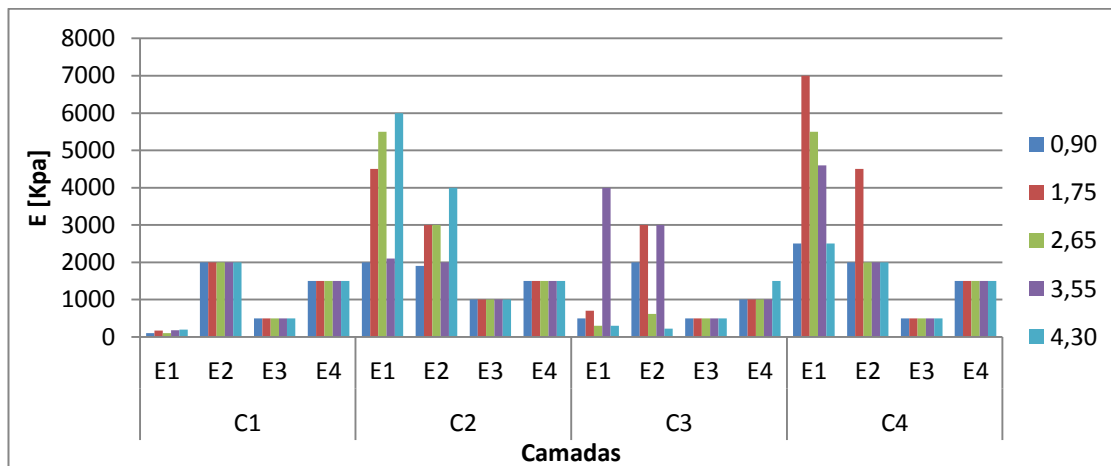
BISAR - 15kN						
Célula	Dist.	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
C1	E1	100	170	100	175	200
	E2	2000	2000	2000	2000	2000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
C2	E1	2000	4500	5500	2100	6000
	E2	1900	3000	3000	2000	4000
	E3	1000	1000	1000	1000	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
C3	E1	500	700	300	4000	300
	E2	2000	3000	620	3000	220
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1500
C4	E1	2500	7000	5500	4600	2500
	E2	2000	4500	2000	2000	2000
	E3	500	500	500	500	500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500

**Quadro 7.14 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para o DIP 2 a 25 kN**

BISAR - 25kN						
Célula	Distância	0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
C1	E1	100	150	95	180	185
	E2	14000	4000	2000	2000	4000
	E3	700	500	500	500	1500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
C2	E1	2200	5000	5000	2800	185
	E2	2000	3500	4000	2000	4000
	E3	800	800	800	800	1500
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
C3	E1	250	500	95	1200	80
	E2	4000	4000	4000	4000	400
	E3	800	800	700	600	500
	E4	1000	1000	1000	1000	1500
C4	E1	2500	10000	6000	4000	3500
	E2	2000	4000	3000	3000	3000
	E3	500	450	400	450	350
	E4	1500	1500	1000	1000	800

### 7.2.3 Análise de resultados

DIP 2



**Figura 7.60 Módulos de Deformabilidade medidos pelo DIP 2, para 15 kN**

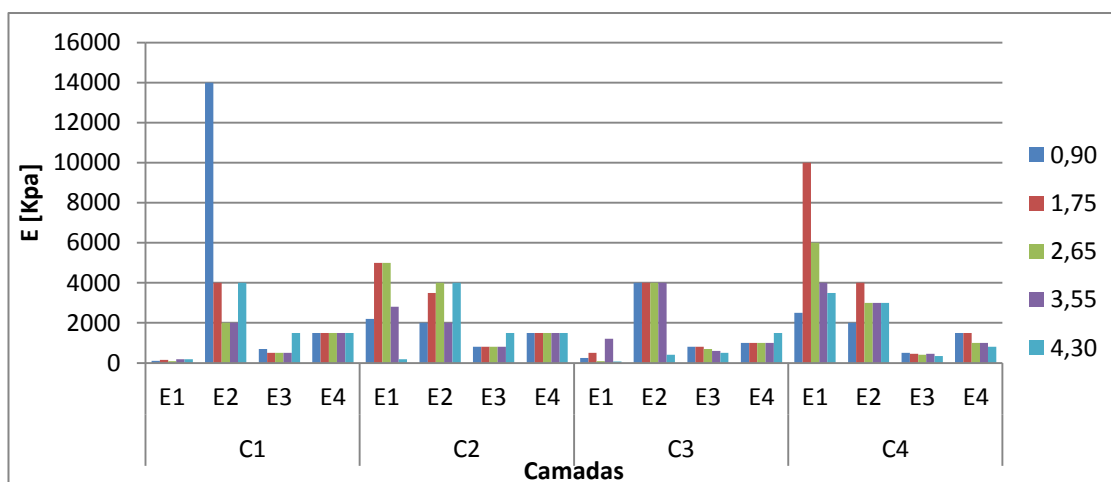


Figura 7.61 Módulos de Deformabilidade medidos pelo DIP 2, para 25 kN

## 7.2.4 Efeito da temperatura

Quadro 7.15 Módulos de deformabilidade dados e corrigidos para as duas campanhas

Célula	Distância (m)	DIP 1		DIP 2	
		E dado 17°C (MPa)	E dado 17-20°C (MPa)	E dado 25°C (MPa)	E dado 25-20°C (MPa)
C2	0,90	3137	2862	1755	2084
	1,75	3196	2916	2601	3088
	2,65	3243	2958	2724	3234
	3,55	315	287	1836	2179
	4,30	3537	3227	3127	3711
C3	0,90	839	765	1058	1256
	1,75	1880	1716	1421	1686
	2,65	1051	959	486	577
	3,55	1085	990	1827	2168
	4,30	1181	1078	239	283
C4	0,90	2434	2221	1457	1730
	1,75	2328	2124	2354	2793
	2,65	1895	1728	1799	2136
	3,55	1686	1538	1736	2060
	4,30	1413	1289	1466	1740

DIP 15 vs DIP 25

**Quadro 7.16 Módulos de deformabilidade obtidos para o DIP 1**

Célula	Distância (m)	DIP 1			
		E dado 17°C (MPa)	E dado 17-20°C (MPa)	E1 estimado pelo BISAR 17°C (MPa)	E1 estimado pelo BISAR 17 -20°C (MPa)
C2	0,90	3137	2862	6000	5474
	1,75	3196	2916	6000	5474
	2,65	3243	2958	7000	6386
	3,55	315	287	400	365
	4,30	3537	3227	9000	8211
C3	0,90	839	765	650	593
	1,75	1880	1716	5500	5018
	2,65	1051	959	650	593
	3,55	1085	990	750	684
	4,30	1181	1078	1050	958
C4	0,90	2434	2221	9500	8667
	1,75	2328	2124	8000	7299
	2,65	1895	1728	9000	8211
	3,55	1686	1538	5500	5018
	4,30	1413	1289	2800	2555



Quadro 7.17 Módulos de deformabilidade obtidos para o DIP 2

Célula	Distância (m)	DIP 2			
		E dado 25°C (MPa)	E dado 25-20°C (MPa)	E1 estimado pelo BISAR 25°C (MPa)	E1 estimado pelo BISAR 25 -20°C (MPa)
C2	0,90	1755	2084	2000	2374
	1,75	2601	3088	4500	5341
	2,65	2724	3234	5500	6528
	3,55	1836	2179	2100	2493
	4,30	3127	3711	6000	7122
C3	0,90	1058	1256	500	593
	1,75	1421	1686	700	831
	2,65	486	577	300	356
	3,55	1827	2168	4000	4748
	4,30	239	283	300	356
C4	0,90	1457	1730	2500	2967
	1,75	2354	2793	7000	8309
	2,65	1799	2136	5500	6528
	3,55	1736	2060	4600	5460
	4,30	1466	1740	2500	2967

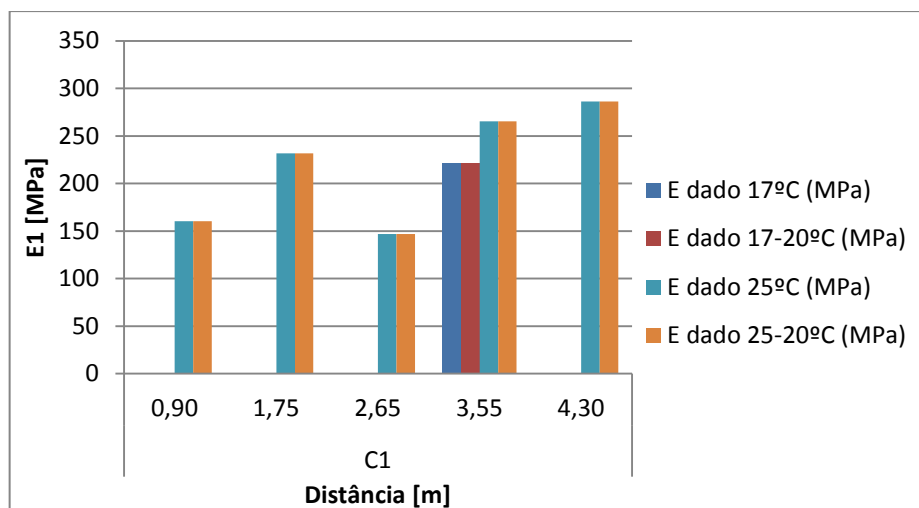


Figura 7.62 Módulos de Deformabilidade dados pelo DIP para a célula 1

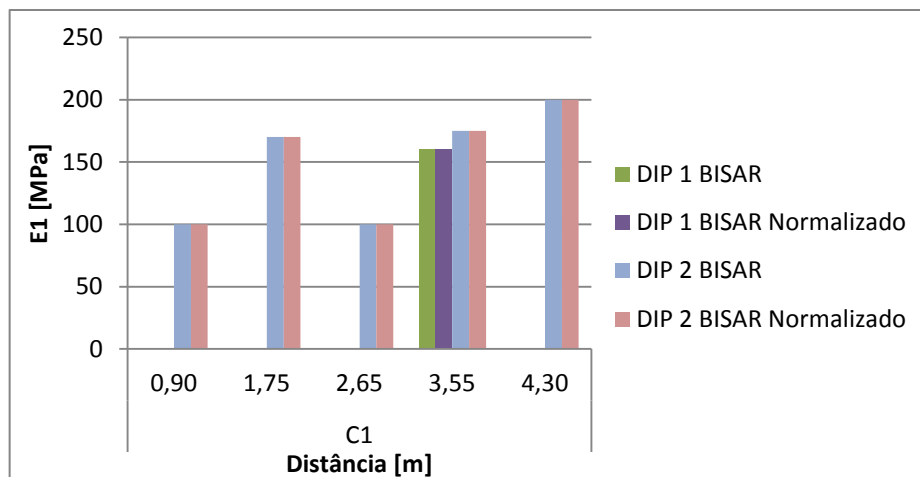


Figura 7.63 Módulos de Deformabilidade estimados pelo BISAR para a célula 1

### 7.3 Efeito da normalização

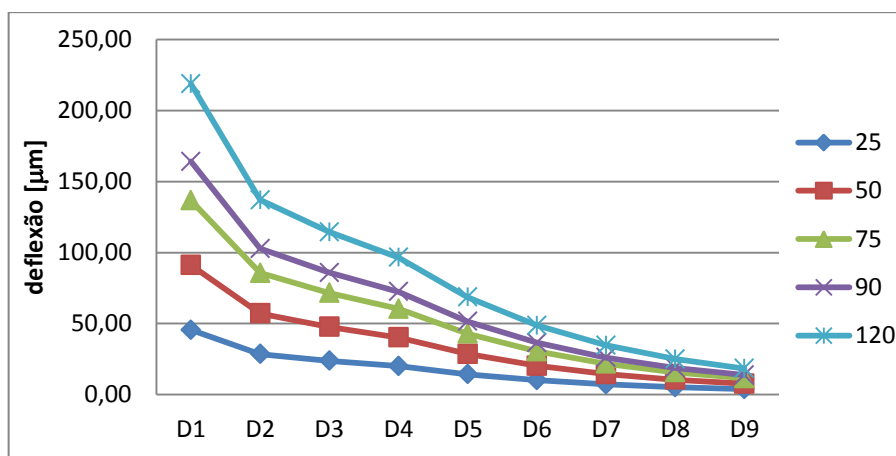


Figura 7.64 Normalização da força de 75 kN para a célula 2

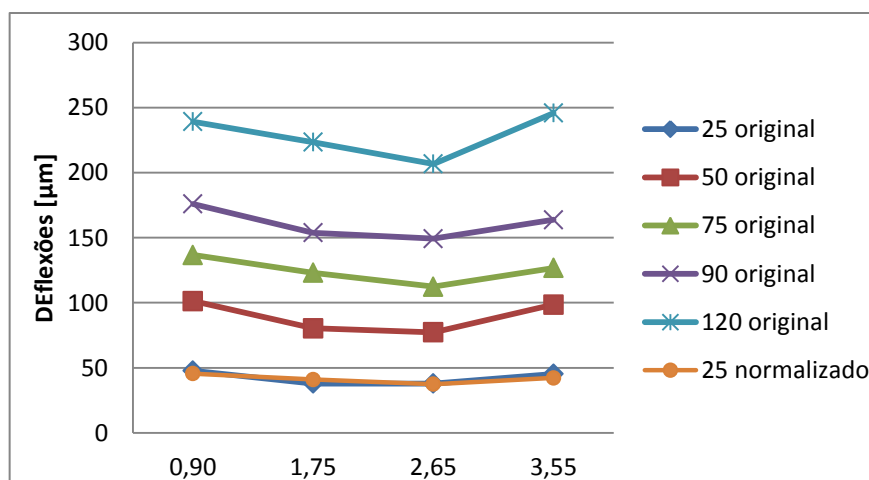


Figura 7.65 Normalização D1 de 75 para 25 kN para a célula 2

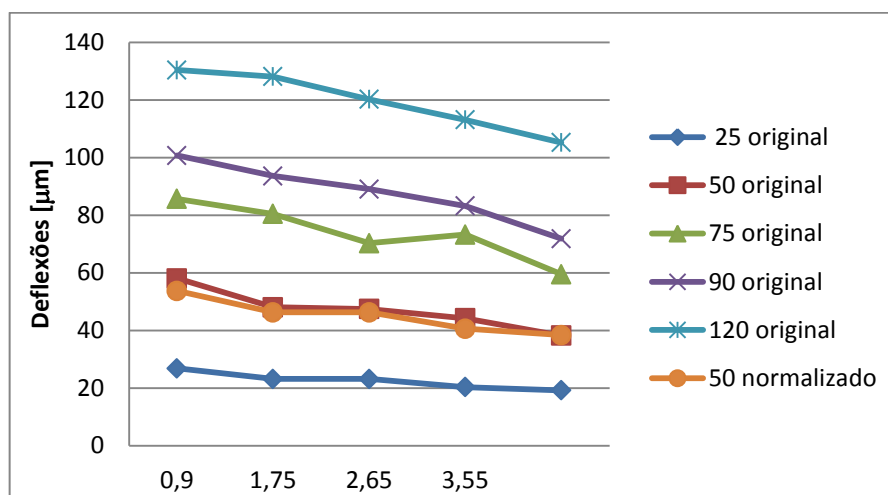


Figura 7.66 Normalização D2 da força 25 para 50 kN da célula 2

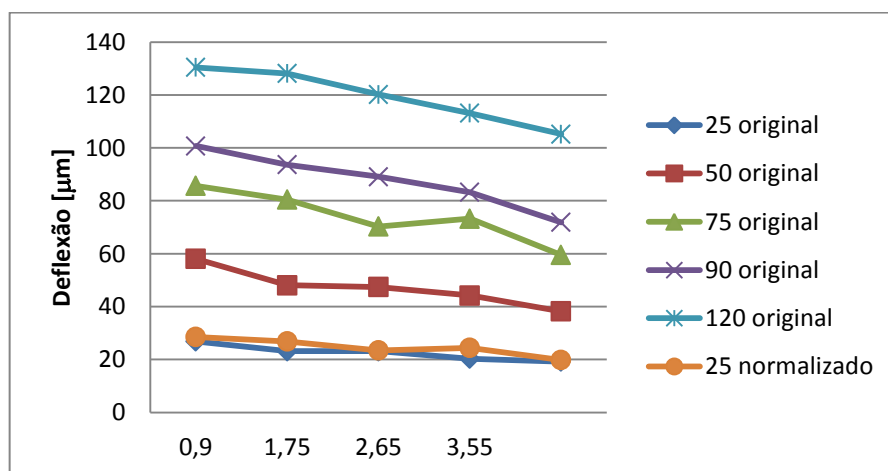


Figura 7.67 Normalização D2 da força 75 para 25 kN da célula 2

Quadro 7.18 Erros de Normalização de D2 ordenados para as diferentes células

Célula	normalizado de 25 kN				normalizado de 75 kN				ordenado					
	25	50	65	95	50	25	15	45	15	25	45	50	65	95
C1	0,06	0,08	0,01	0,00	0,09	0,02	0,08	0,09	0,08	0,06	0,09	0,09	0,01	0,00
C2	0,07	0,06	0,04	0,01	0,06	0,02	0,02	0,05	0,02	0,07	0,05	0,06	0,04	0,01
C3	0,07	0,03	0,07	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,04	0,04	0,07	0,00
C4	0,09	0,12	0,16	0,19	0,14	0,04	0,04	0,08	0,04	0,09	0,08	0,14	0,16	0,19

## 7.4 Avaliação da capacidade de carga

FWD

Quadro 7.19 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 50 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
50 kN	C1	0,90	530	530	159
		1,75	160	160	154
		2,65	250	250	63
		3,55	650	650	93
		4,30	400	400	152
	C2	0,90	8000	7299	29
		1,75	5000	4562	84
		2,65	6000	5474	87
		3,55	4000	3649	45
		4,30	8000	7299	29
	C3	0,90	500	456	0
		1,75	800	730	1
		2,65	370	338	0
		3,55	1200	1095	3
		4,30	1800	1642	6
	C4	0,90	9000	8211	67
		1,75	9500	8667	55
		2,65	8000	7299	35
		3,55	6500	5930	4
		4,30	5000	4562	4

Quadro 7.20 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 75 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
75 kN	C1	0,90	620	620	146
		1,75	230	230	140
		2,65	380	380	66
		3,55	730	730	86
		4,30	480	480	184
	C2	0,90	6000	5474	68
		1,75	7000	6386	79
		2,65	7000	6386	89
		3,55	4000	3649	82
		4,30	6000	5474	78
	C3	0,90	550	502	0
		1,75	800	730	1
		2,65	360	328	0
		3,55	1100	1004	2
		4,30	1500	1368	4
	C4	0,90	9000	8211	54
		1,75	11000	10036	39
		2,65	14000	12773	8
		3,55	6000	5474	4
		4,30	5500	5018	3

Quadro 7.21 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 90 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
90 kN	C1	0,90	680	680	161
		1,75	280	280	179
		2,65	500	500	56
		3,55	770	770	96
		4,30	130	130	162
	C2	0,90	5000	4562	65
		1,75	6000	5474	78
		2,65	6000	5474	78
		3,55	3000	2737	78
		4,30	5000	4562	87
	C3	0,90	500	456	0
		1,75	750	684	1
		2,65	300	274	0
		3,55	1000	912	2
		4,30	1100	1004	2
	C4	0,90	5500	5018	54
		1,75	6500	5930	45
		2,65	8800	8028	9
		3,55	5000	4562	3
		4,30	7500	6842	1

Quadro 7.22 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, para 120 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
120 kN	C1	0,90	730	730	175
		1,75	350	350	195
		2,65	800	800	57
		3,55	800	800	81
		4,30	140	140	144
	C2	0,90	3000	2737	70
		1,75	4000	3649	73
		2,65	5000	4562	76
		3,55	2000	1825	74
		4,30	4000	3649	80
	C3	0,90	450	411	0
		1,75	550	502	0
		2,65	240	219	0
		3,55	710	648	1
		4,30	750	648	1
	C4	0,90	5500	5018	54
		1,75	8500	7755	39
		2,65	10000	9123	4
		3,55	3500	3193	3
		4,30	9500	8667	3

Quadro 7.23 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os Pdim da C3 considerada ligada

Célula	Força	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
C3_ ligada	25	0,90	260	237	147
		1,75	430	392	151
		2,65	260	237	125
		3,55	600	547	121
		4,30	8000	7299	120
	50	0,90	270	246	187
		1,75	400	365	151
		2,65	240	219	125
		3,55	590	538	121
		4,30	1300	1186	110
	75	0,90	260	237	179
		1,75	330	301	179
		2,65	200	182	146
		3,55	590	538	121
		4,30	500	456	146
	90	0,90	240	219	179
		1,75	330	301	153
		2,65	180	164	138
		3,55	550	502	121
		4,30	400	365	146
	120	0,90	220	201	179
		1,75	260	237	198
		2,65	150	137	138
		3,55	470	429	120
		4,30	310	283	146



DIP

Quadro 7.24 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, o DIP 1 a 15 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
15 kN	C1	0,90	-	-	-
		1,75	-	-	-
		2,65	-	-	-
		3,55	160	160	60
		4,30	-	-	-
	C2	0,90	6000	5473,953106	121
		1,75	6000	5473,953106	121
		2,65	7000	6386,278624	123
		3,55	400	364,9302071	0
		4,30	9000	8210,92966	126
	C3	0,90	650	593,0115865	0
		1,75	5500	5017,790348	5
		2,65	650	593,0115865	0
		3,55	750	684,2441383	0
		4,30	1050	957,9417936	1
	C4	0,90	9500	8667,092419	72
		1,75	8000	7298,604142	69
		2,65	9000	8210,92966	30
		3,55	5500	5017,790348	38
		4,30	2800	2554,51145	30

Quadro 7.25 Módulos Corrigidos para a temperatura de projecto e os respectivos Pdim, o DIP 1 a 25 kN

Força	Célula	Distância (m)	E1 (MPa)	E1 Corrigido (MPa)	Pdim (anos)
25 kN	C1	0,90	-	-	-
		1,75	-	-	-
		2,65	-	-	-
		3,55	160	160	60
		4,30	-	-	-
	C2	0,90	7500	6842,441383	119
		1,75	7500	6842,441383	119
		2,65	7500	6842,441383	119
		3,55	400	364,9302071	0
		4,30	330	301,0674209	122
	C3	0,90	200	182,4651035	0
		1,75	790	720,737159	1
		2,65	290	264,5744001	0
		3,55	330	301,0674209	0
		4,30	400	364,9302071	0
	C4	0,90	12000	10947,90621	68
		1,75	12000	10947,90621	63
		2,65	11000	10035,5807	48
		3,55	3500	3193,139312	44
		4,30	3000	2736,976553	32

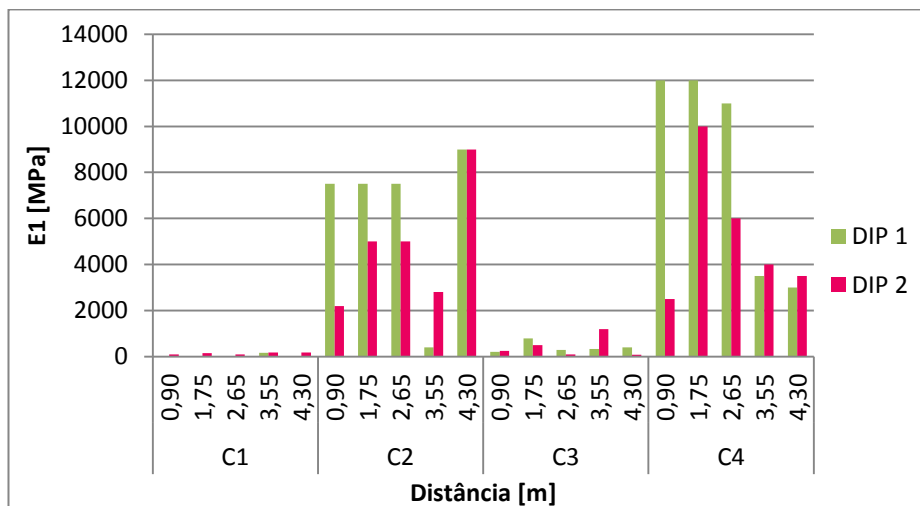


Figura 7.68 Módulos de Deformabilidade Normalizados Estimados pelo BISAR para 25 kN

## 7.5 Estudo paramétrico

Quadro 7.26 Valores completos para a hipótese A

Camada conjunta	k	1,907	2,170	2,605	2,965	<b>3,278</b>	3,558	3,814	4,050	4,270	4,477
	h2	150	200	300	400	<b>500</b>	600	700	800	900	1000
	E3	60									
	E2	114	130	156	178	<b>197</b>	213	229	243	256	269

Quadro 7.27 Valores completos para a hipótese B

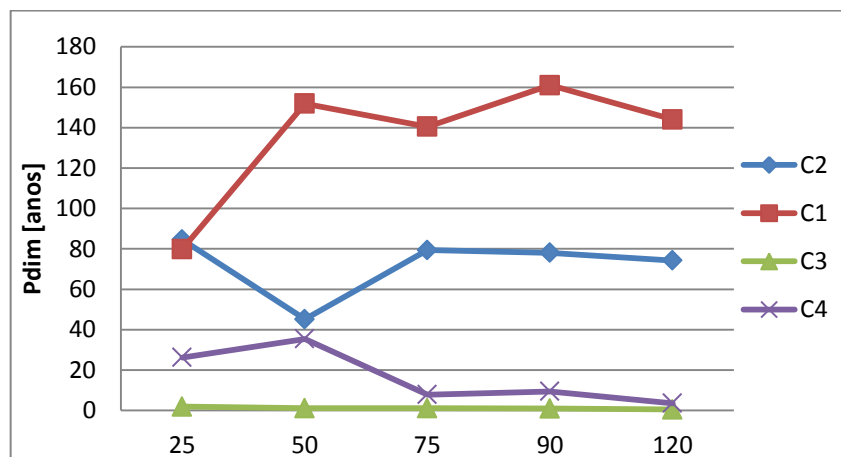
Camadas de 15 cm	total h	150	300	450	<b>600</b>	750	900	1050	1200	1350	1500
	k	1,907	1,907	1,907	<b>1,907</b>	1,907	1,907	1,907	1,907	1,907	1,907
	h2	150	150	150	<b>150</b>	150	150	150	150	150	150
	E3	60	114	218	<b>416</b>	793	1512	2883	5496	10479	19980
	E2	114	218	416	<b>793</b>	1512	2883	5496	10479	19980	38094
	nºh	1	2	3	<b>4</b>	5	6	7	8	9	10
	E2 total	114	333	748	<b>1541</b>	3053	5936	11432	21911	41891	79985
	E2 media	114	166	249	<b>385</b>	611	989	1633	2739	4655	7998

Quadro 7.28 Valores completos para a hipótese C

Camadas de 20 cm	total h	200	400	<b>600</b>	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
	k	2,170	2,170	<b>2,170</b>	2,170	2,170	2,170	2,170	2,170	2,170	2,170
	h2	200	200	<b>200</b>	200	200	200	200	200	200	200
	E3	60	130	<b>283</b>	613	1331	2888	6268	13602	29519	64061
	E2	130	283	<b>613</b>	1331	2888	6268	13602	29519	64061	139023
	nº h	1	2	<b>3</b>	4	5	6	7	8	9	10
	E2 total	130	413	<b>1026</b>	2357	5245	11513	25115	54634	118695	257717
	E2 media	130	206	<b>342</b>	589	1049	1919	3588	6829	13188	25772

**Quadro 7.29** Períodos de vida úteis medianos para todas as células ensaiadas pelo FWD

Célula	Força (kN)	Pdim mediano (anos)
C1	25	80
	50	152
	75	140
	90	161
	120	144
C2	25	85
	50	45
	75	79
	90	78
	120	74
C3	25	2
	50	1
	75	1
	90	1
	12'	0
C4	25	26
	50	35
	75	8
	90	9
	120	4



**Figura 7.69** Balanço da vida útil mediana para todas as células ensaiadas pelo FWD